

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Електроніка. Основи теорії кіл і сигналів»  
зі спеціальності «Біомедична інженерія»**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Електроніка. Основи теорії кіл і сигналів»  
зі спеціальності «Біомедична інженерія»**

Вінниця  
ВНТУ  
2026

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 18.12.2025 р.)

Рецензенти:

**О. В. Осадчук**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем ВНТУ

**С. В. Тимчик**, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційних електронних систем ВНТУ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Електроніка. Основи теорії кіл і сигналів» зі спеціальності «Біомедична інженерія» [Електронний ресурс] / уклад. С. В. Костішин, Д. Х. Штофель. – Вінниця : ВНТУ, 2026. – (PDF, 56 с.)

У методичних вказівках наведено рекомендації щодо виконання, теоретичні відомості, індивідуальні завдання, а також вимоги до змісту лабораторних робіт з дисципліни «Електроніка. Основи теорії кіл і сигналів» для студентів спеціальності «Біомедична інженерія» кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету.

## ЗМІСТ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	
Ознайомлення з основними вимірjuвальними приладами та макетами.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	
Експериментальна перевірка законів Ома і кірхгофа у колах постійного струму .....	11
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	
Експериментальна перевірка закону Ома у колах гармонічного струму .....	17
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	
Дослідження лінійного електричного кола змінного струму з паралельним та послідовним з'єднанням елементів.....	24
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	
Дослідження послідовного коливального контуру .....	29
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	
Дослідження паралельного коливального контуру 1-го виду.....	34
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7	
Дослідження паралельних коливальних контурів 2-го і 3-го видів.....	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8	
Дослідження фільтрів нижніх і верхніх частот.....	43
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9	
Дослідження перехідних процесів в лінійних електричних колах та форми вихідних імпульсів.....	48
ЛІТЕРАТУРА.....	55

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ОСНОВНИМИ ВИМІРЮВАЛЬНИМИ ПРИБЛАДАМИ ТА МАКЕТАМИ

### 1. Мета роботи

Ознайомитися з правилами техніки безпеки при роботі в лабораторії електричних кіл. Вивчити призначення та принцип дії основних вимірювальних приладів: мультиметра та осцилографа. Освоїти методику вимірювання основних параметрів електричних кіл (напруга, струм, опір). Ознайомитися з поняттями метрології: абсолютною, відносною та приведеною похибками вимірювань. Навчитися основам моделювання електричних схем у програмному середовищі емуляції електронних схем (на прикладі NI Multisim).

### 2. Обладнання та програмне забезпечення

1. Лабораторний макет з набором резисторів різних номіналів.
2. Цифровий мультиметр.
3. Цифровий запам'ятовуючий осцилограф.
4. Джерело живлення постійного струму.
5. Персональний комп'ютер зі встановленим ПЗ NI Multisim.

### 3. Теоретичні відомості

#### 3.1. Основні поняття метрології та види похибок

Вимірювання – це процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів. Жодне вимірювання не може бути виконано абсолютно точно. Завжди існує різниця між виміряним значенням величини ( $X_{вим}$ ) та її істинним значенням ( $X_{іст}$ ). Цю різницю називають похибкою вимірювання. Існують кілька видів похибок:

1. Абсолютна похибка ( $\Delta X$ ) – це різниця між виміряним та істинним значенням величини (виражається в одиницях вимірюваної величини):

$$\Delta X = |X_{вим} - X_{іст}|$$

*Примітка: Оскільки істинне значення часто невідоме, замість нього використовують дійсне значення (наприклад, номінал елемента або середнє арифметичне багатьох вимірів).*

2. Відносна похибка ( $\delta$ ) – відношення абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини (зазвичай виражається у відсотках):

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{іст}} \cdot 100\%$$

3. Приведена похибка ( $\gamma$ ) – відношення абсолютної похибки до нормуючого значення (зазвичай, це верхня межа діапазону вимірювання приладу):

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100\%$$

Саме приведена похибка визначає клас точності аналогових приладів.

### 3.2. Робота з цифровим мультиметром

Цифровий мультиметр (DMM – Digital Multimeter) – це універсальний прилад для вимірювання напруги (постійної та змінної), струму (постійного та змінного), опору, а також часто перевірки діодів та «продзвонки» контакту з'єднань.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд мультиметра

Основні елементи інтерфейсу (рис. 1.1):

1. Дисплей: відображає результати вимірювань.
2. Перемикач режимів: вибирає тип вимірювання та діапазон:  
«V=» (DCV) – напруга постійного струму; «V≈» (ACV) – напруга змінного струму; «A=» (DCA) – струм постійний; «A≈» (ACA) – струм змінний; опір; (ємність, температура – опціонально).
3. Гнізда для щупів: «COM» – спільне гніздо (зазвичай чорний щуп), підключається до «мінуса» або землі; «VΩmA» – гніздо для вимірювання напруги, опору та малих струмів (зазвичай червоний щуп); «10A» (або «20A») – гніздо для вимірювання великих струмів (зазвичай червоний щуп).

Правила підключення мультиметра:

- Режим вольтметра (вимірювання напруги) – підключається паралельно до ділянки кола, де потрібно виміряти різницю потенціалів. Має дуже високий внутрішній опір.
- Режим амперметра (вимірювання струму) – підключається послідовно у розрив гілки кола, де потрібно виміряти струм. Має дуже малий внутрішній опір.
- Режим омметра (вимірювання опору) – вимірювання проводиться тільки на знеструмленому елементі. Резистор бажано від'єднати хоча б одним виводом від решти схеми, щоб уникнути впливу інших елементів.

*ВАЖЛИВО! Підключення амперметра паралельно до джерела напруги призведе до короткого замикання та виходу приладу з ладу (згорить запобіжник).*

### 3.3. Робота з цифровим осцилографом

Осцилограф – це прилад для візуального спостереження та дослідження форми електричних сигналів (залежності напруги від часу).

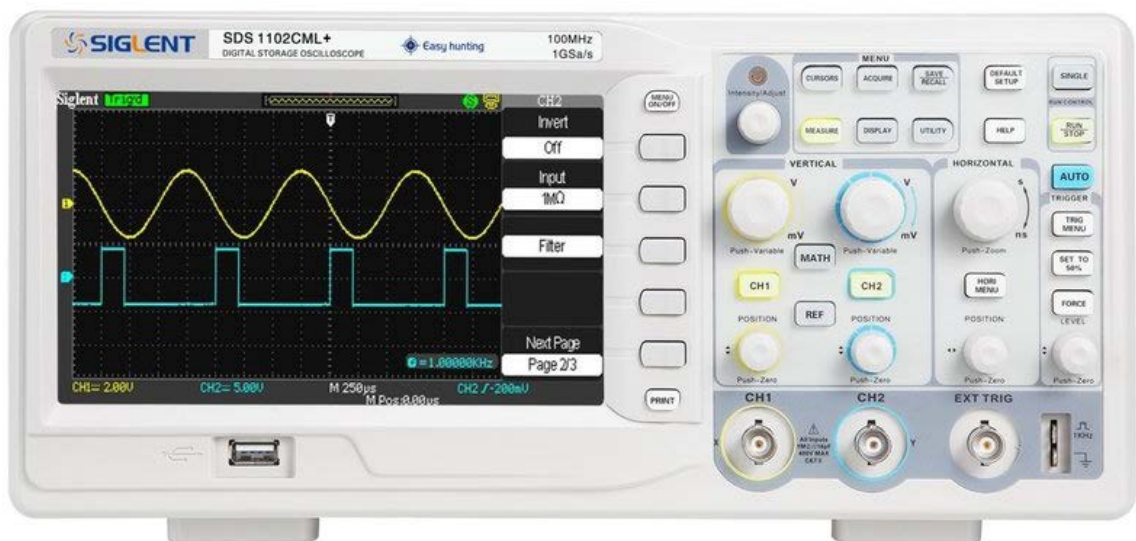


Рисунок 1.2 – Зображення цифрового осцилографа

Основні принципи роботи (рис. 1.2). Екран осцилографа – це координатна сітка. Вертикальна вісь (Y) – відображає напругу (амплітуду сигналу). Масштаб регулюється ручкою VOLTS/DIV (Вольт/поділку). Якщо встановлено 2V/div, то відповідно одна клітинка по вертикалі дорівнює 2 вольтам. Горизонтальна вісь (X) – відображає час. Масштаб регулюється ручкою SEC/DIV (Час/поділку). Якщо встановлено 1ms/div, то одна клітинка по горизонталі дорівнює 1 мілісекунді.

За допомогою осцилографа можна виміряти: амплітуду ( $U_m$ ), розмах (peak-to-peak,  $U_{pp}$ ), період ( $T$ ) та частоту ( $f = 1 / T$ ) сигналу, а також побачити його форму (синусоїда, прямокутник тощо).

### 3.4. Основи роботи в NI Multisim

NI Multisim – це потужне середовище для схемотехнічного моделювання (симуляції) електронних схем (рис. 1.3). Воно дозволяє збирати схеми на віртуальному робочому столі та проводити їх аналіз за допомогою віртуальних приладів, аналогічних реальним.

Основні кроки при створенні схеми в Multisim:

1. Розміщення компонентів: меню Place → Component. Вибираємо потрібну групу (наприклад, Sources для джерел живлення, Basic для резисторів).

2. З'єднання компонентів: наведіть курсор на вивід компонента, з'явиться чорна крапка. Натисніть і тягніть провід до виводу іншого компонента.

3. Додавання «Землі» (Ground): кожна схема в Multisim повинна мати точку з нульовим потенціалом (GND). Знаходиться в Place → Component → Sources → Power\_sources → Ground.

4. Використання вимірювальних приладів: панель інструментів праворуч містить віртуальні прилади (Multimeter, Oscilloscope, Wattmeter). Їх перетягують на робоче поле і підключають так само, як і реальні прилади.

5. Запуск симуляції: кнопка «Start/Resume Simulation» (зелений трикутник «Play») або клавіша F5.

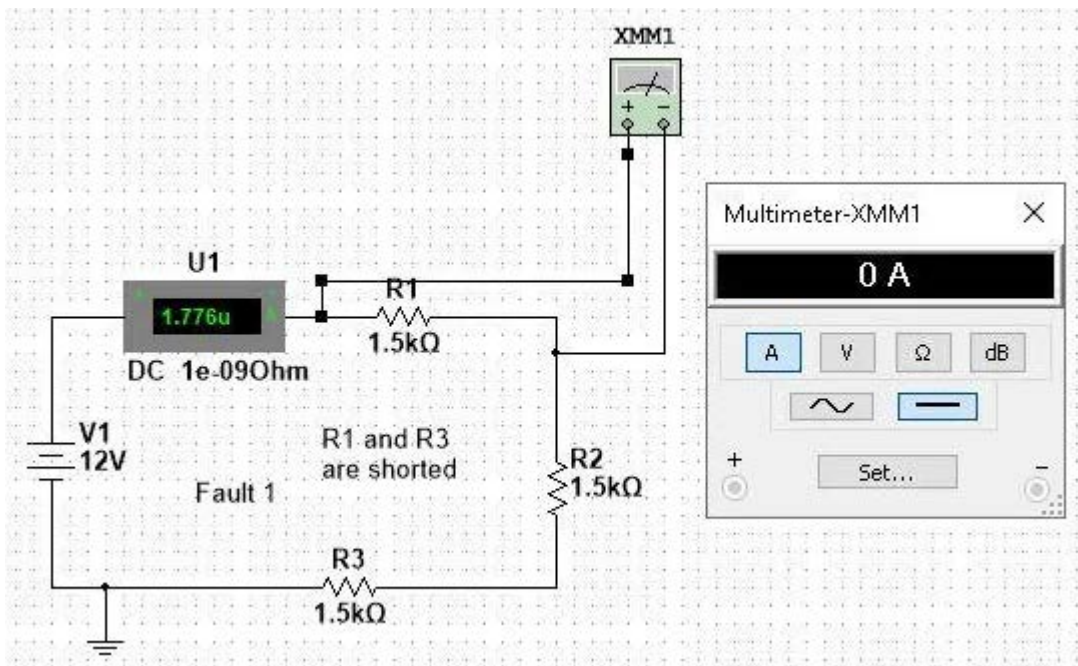


Рисунок 1.3 – Приклад простої схеми в середовищі Multisim та підключення віртуальних приладів.

## 4. Хід роботи

### 4.1. Робота з реальними компонентами та визначення похибок:

1. Отримайте у викладача лабораторний макет та набір резисторів. Виберіть 3 резистори.
2. Визначте його номінальний опір ( $R_{ном}$ ) та допуск (клас точності) за кольоровим маркуванням (або написом на корпусі). Якщо допуск становить, наприклад,  $\pm 5\%$ , це означає, що виробник гарантує, що реальний опір знаходиться в межах  $R_{реал} = \pm 0,05 R_{ном}$ .
3. Підготуйте мультиметр до вимірювання опору: переведіть перемикач у сектор  $\Omega$ , щупи встановіть у гнізда COM та  $V\Omega mA$ .
4. Виміряйте реальний опір резистора ( $R_{вим}$ ) мультиметром.
5. Приймаючи номінальне значення за істинне, розрахуйте:
  - абсолютну похибку виготовлення резистора;
  - відносну похибку виготовлення резистора.
6. Порівняйте отриману відносну похибку із заводським допуском резистора. Зробіть висновок про відповідність резистора заявленому класу точності.
7. Результати запишіть у таблицю 1.1 звіту.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювання параметрів компонентів

№	$R_{ном}$ , Ом	Допуск, %	$R_{вим}$ , Ом	$\Delta R$ , Ом	$\delta R$ , %	Висновок
1						
2						
3						

### 4.2. Моделювання електричного кола в NI Multisim

1. Запустіть програму NI Multisim.
2. Складіть електричну схему послідовного з'єднання джерела постійної напруги та двох резисторів, як показано на рис. 1.4.
  - Значення ЕРС джерела ( $E$ ) та опорів резисторів ( $R1$ ,  $R2$ ) візьміть зі свого варіанту індивідуального завдання.

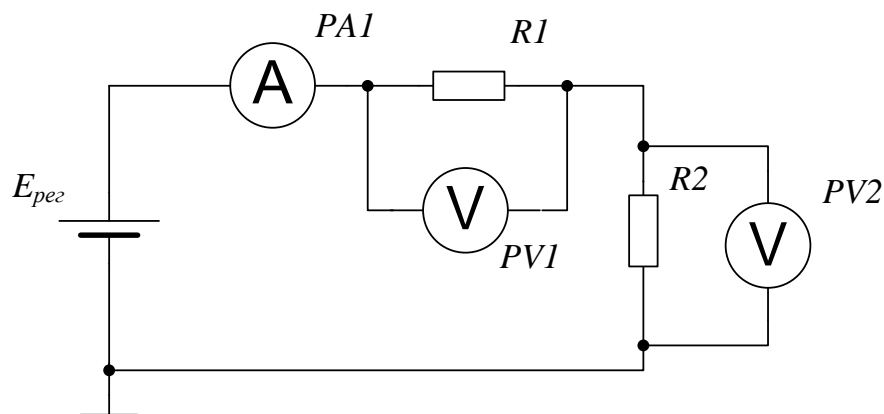


Рисунок 1.4 – Схема для дослідження в Multisim

3. Теоретичний розрахунок: перед початком симуляції розрахуйте теоретично за законом Ома та правилами для послідовного з'єднання:

- Загальний опір кола:  $R_{екв} = R1 + R2$ .
- Струм в колі:  $I = E / R_{екв}$ .
- Падіння напруги на кожному резисторі:  $U_1 = I R1$ ;  $U_2 = I R2$ .
- Перевірте баланс напруг (другий закон Кірхгофа):  $E = U_1 + U_2$ .

4. Експеримент в Multisim:

- Підключіть віртуальний мультиметр PA1 в режимі амперметра (послідовно) для вимірювання струму  $I$ .
- Підключіть віртуальний мультиметр PV1 в режимі вольтметра (паралельно до  $R1$ ) для вимірювання  $U_1$ .
- Підключіть віртуальний мультиметр PV2 в режимі вольтметра (паралельно до  $R2$ ) для вимірювання  $U_2$ .

5. Запустіть симуляцію (F5). Запишіть покази приладів.

6. Порівняйте теоретичні та експериментальні (отримані в Multisim) дані. Вони повинні майже ідеально співпадати, оскільки Multisim використовує ідеальні моделі компонентів (якщо не налаштовано інакше).

7. Результати запишіть у таблицю 1.2 звіту. Вставте скріншот зібраної схеми з показами приладів у звіт.

Таблиця 1.2 – Результати роботи з середовищем NI Multisim

Параметр	Теоретичне значення	Значення в Multisim	Примітка
$I, A$			
$U_1, B$			
$U_2, B$			
$E_{перев} (U_1+U_2), B$			

## 5. Індивідуальне завдання

Таблиця 1.3 – Індивідуальні завдання згідно варіантів

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
E, B	10	12	5	15	24	9	10	12
R1, Ом	100	200	1000	470	1200	150	300	1000
R2, Ом	100	400	500	330	2400	50	700	1000
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
E, B	5	20	15	30	6	18	12	15
R1, Ом	220	500	820	2000	330	680	500	150
R2, Ом	100	1500	180	1000	680	470	100	1000

## 6. Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Мета роботи.
3. До п.4.1:
  - Тип та модель використовуваного мультиметра.
  - Таблиця 1.1 з результатами вимірювання резистора та розрахунком похибок.
  - Висновок про відповідність резистора його класу точності.
4. До п. 4.2:
  - Номер варіанту та вихідні дані ( $E$ ,  $R1$ ,  $R2$ ).
  - Формули та хід теоретичного розрахунку  $I$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ .
  - Скріншот схеми з Multisim із підключеними приладами під час симуляції.
  - Таблиця 1.2 (порівняльна таблиця теоретичних та модельованих даних).
5. Загальні висновки по роботі.

## 7. Контрольні запитання

1. У чому різниця між істинним та вимірним значенням фізичної величини?
2. Дайте визначення абсолютної та відносної похибки. У чому їх принципова різниця?
3. Що таке клас точності приладу?
4. Як правильно підключати вольтметр до електричного кола? Чому?
5. Як правильно підключати амперметр до електричного кола? До чого призведе його помилкове паралельне підключення до джерела напруги?
6. Яких правил безпеки слід дотримуватись при вимірюванні опору мультиметром?
7. Які основні параметри сигналу можна визначити за допомогою осцилографа?
8. За що відповідають ручки VOLTS/DIV та SEC/DIV на панелі осцилографа?
9. Яка роль компонента «GROUND» при моделюванні схем у NI Multisim?
10. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
11. Сформулюйте другий закон Кірхгофа для контуру.
12. Як розраховується еквівалентний опір при послідовному з'єднанні резисторів?
13. Як розраховується еквівалентний опір при паралельному з'єднанні резисторів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ ОМА І КІРХГОФА У КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 1. Мета роботи

Експериментально перевірити закон Ома для ділянки кола та для повного кола. Експериментально підтвердити справедливість першого та другого законів Кірхгофа у розгалуженому електричному колі постійного струму. Набути навичок складання електричних схем, вимірювання струмів, напруг та ЕРС за допомогою мультиметрів. Дослідити вольт-амперні характеристики (ВАХ) лінійних резистивних елементів.

### 2. Прилади та обладнання

1. Лабораторний стенд з набором резисторів різних номіналів та джерелами постійної напруги (ЕРС).
2. Цифрові мультиметри (вольтметри, амперметри) – 2-3 шт.
3. З'єднувальні провідники.
4. Персональний комп'ютер зі встановленим ПЗ NI Multisim

### 3. Теоретичні відомості

Електричним колом називають сукупність пристроїв, призначених для генерування, передачі, перетворення та споживання електричної енергії.

Закон Ома для ділянки кола (нерозгалужене коло) – струм  $I$  на ділянці кола прямо пропорційний напрузі  $U$  на кінцях цієї ділянки і обернено пропорційний її опору  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}$$

Звідси, напруга (або падіння напруги) на резисторі:  $U = I R$ .

Лінійним називається елемент, опір якого не залежить від величини та напрямку струму, що протікає через нього. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) лінійного резистора – це пряма лінія, що проходить через початок координат.

Закон Ома для повного кола – струм у замкненому колі, що містить джерело ЕРС  $E$  з внутрішнім опором  $r_0$  та зовнішнє навантаження  $R$ , визначається як:

$$I = \frac{U}{R + r_0}$$

Напруга на затискачах реального джерела під навантаженням завжди менша за його ЕРС:

$$U_{\text{заг}} = E - I \cdot r_0$$

*Закони Кірхгофа* є фундаментальними законами для розрахунку розгалужених електричних кіл. Вони оперують наступними поняттями: вузол – місце з'єднання трьох і більше гілок; гілка – ділянка кола між двома вузлами, вздовж якої протікає один і той самий струм; контур – будь-який замкнений шлях, що проходить через кілька гілок і вузлів.

*Перший закон Кірхгофа* (для вузлів): алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

Правило знаків – струми, що входять у вузол, беруться зі знаком «+», а ті, що виходять з вузла – зі знаком «-» (потрібно дотримуватися однаковості).

*Другий закон Кірхгофа* (для контурів): у будь-якому замкненому контурі електричного кола алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі спадків напруг на всіх резистивних елементах цього контуру.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{l=1}^m I_k R_k$$

Правило знаків:

1. Обирають довільний напрямок обходу контуру (наприклад, за годинниковою стрілкою).
2. ЕРС враховується зі знаком «+», якщо її напрямок збігається з напрямком обходу контуру, і зі знаком «-», якщо протилежний.
3. Спадок напруги  $I_k R_k$  враховується зі знаком «+», якщо обраний умовно позитивний напрямок струму в гілці збігається з напрямком обходу контуру, і зі знаком «-» у протилежному випадку.

#### 4. Опис лабораторної установки та схеми

Для виконання роботи використовуються дві схеми.

##### 4.1. Схема 1 для перевірки закону Ома та зняття ВАХ резистора

Це просте нерозгалужене коло, що складається з регульованого джерела напруги  $E_{\text{рег}}$ , досліджуваного резистора  $R_{\text{досл}}$ , амперметра ( $PAI$ ) для вимірювання струму в колі та вольтметра ( $PVI$ ) для вимірювання напруги безпосередньо на резисторі.

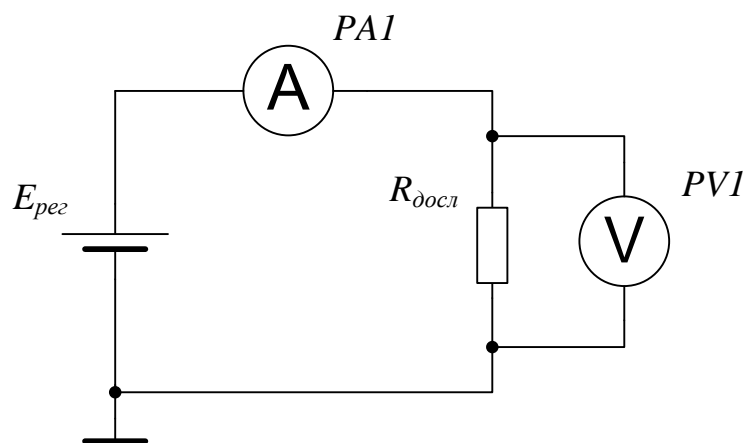


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова для дослідження закону Ома.

#### 4.2. Схема 2 для перевірки законів Кірхгофа у розгалуженому колі

Схема містить два вузли (позначимо їх  $a$  і  $b$ ) та три гілки. У схемі використовуються два джерела ЕРС ( $E1$ ,  $E2$ ) та три резистори ( $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ). Амперметри  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$  вимірюють струми у відповідних гілках.

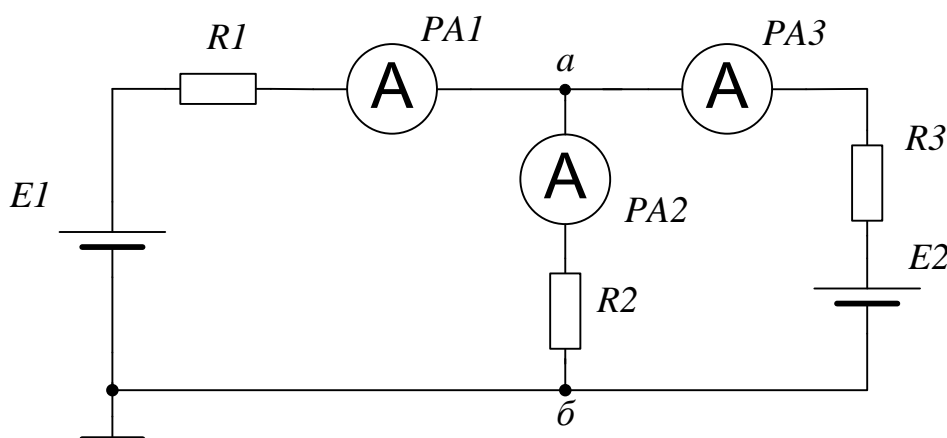


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова для перевірки законів Кірхгофа.

### 5. Хід роботи

#### 5.1. Експериментальна перевірка закону Ома та побудова ВАХ.

1. Зібрати електричне коло згідно рисунку 2.1, використовуючи резистор  $R_{досл}$  номіналом близько 500 Ом – 1 кОм (точне значення виміряти мультиметром перед початком роботи і записати:  $R_{вим} = \text{___ Ом}$ ).

2. Змінюючи напругу джерела живлення  $E_{peg}$  від 0 до 15-20 В з кроком приблизно 2-3 В, вимірювати покази амперметра  $I$  та вольтметра  $U$ .

3. Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

4. За даними таблиці побудувати графік вольт-амперної характеристики резистора  $I(U)$ . Переконатися у її лінійності.

5. Розрахувати середнє значення опору за даними вимірювань ( $R_{розр} = U/I$ ) для кожної точки та порівняти його з вимірним мультиметром  $R_{вим}$ .

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань для перевірки закону Ома

№	Напруга $U$ , В	Струм $I$ , мА	Розрахований опір $R=U/I$ , кОм
1	0	0	-
2			
3			
4			
5			
6			
...			

### 5.2. Експериментальна перевірка законів Кірхгофа.

1. Отримати у викладача варіант індивідуального завдання (значення резисторів та ЕРС джерел) згідно індивідуального завдання.

2. Перед збиранням схеми виміряти мультиметром реальні значення опорів резисторів  $R_1, R_2, R_3$  та ЕРС джерел  $E_1, E_2$  (вимірювання ЕРС проводити на холостому ході джерела). Записати ці значення у протокол.

3. Зібрати розгалужене електричне коло згідно з рисунком 2.2.

*ВАЖЛИВО! Дотримуйтесь полярності підключення джерел ЕРС та амперметрів.*

4. Увімкнути джерела живлення.

5. Виміряти струми в усіх трьох гілках ( $I_1, I_2, I_3$ ) за допомогою амперметрів. Звернути увагу на напрямок відхилення стрілки або знак на цифровому дисплеї. Якщо прилад показує «мінус», це означає, що реальний напрямок струму протилежний обраному умовно позитивному напрямку підключення приладу. Записати значення струмів з урахуванням їх знаків до таблиці 2.2.

6. Виміряти вольтметром напруги (спадок напруги) безпосередньо на кожному резисторі ( $U_{R1}, U_{R2}, U_{R3}$ ).

7. Виміряти напругу між вузлами  $U_{ab}$ .

8. Результати всіх вимірювань занести до таблиці 2.2.

9. Вимкнути живлення схеми.

### 5.3. Обробка результатів та перевірка законів.

1. Перевірка 1-го закону Кірхгофа: Для вузла а (верхній вузол на рис. 2.2) записати рівняння закону Кірхгофа, вважаючи, що всі струми направлені від джерел до вузла (або відповідно до полярності амперметрів). Підставити виміряні значення струмів з урахуванням їх знаків. Обчислити алгебраїчну суму. Результат ( $\Sigma I$ ) має бути близьким до нуля. Приклад рівняння для вузла а (якщо струми  $I_1, I_3$  входять,  $I_2$  виходить):  $I_1 - I_2 + I_3 = \Sigma I \approx 0$ .

2. Перевірка 2-го закону Кірхгофа: Обрати лівий контур (джерело  $E_1$ , резистори  $R_1$  та  $R_2$ ). Обрати напрямок обходу (наприклад, за годинниковою стрілкою). Записати рівняння закону Кіргофа:  $E_1 = I_1 R_1 + I_2 R_2$ .

Підставити вимірні значення ЕРС та обчислені спадання напруг ( $I_{вим} R_{вим}$ ). Порівняти ліву та праву частини рівняння. Аналогічно перевірити правий контур (джерело  $E2$ , резистори  $R3$  та  $R2$ ). Аналогічно перевірити зовнішній великий контур (джерела  $E1, E2$ , резистори  $R1, R3$ ).

3. Результати перевірок занести до таблиці 2.3. Обчислити відносну похибку перевірки законів.

$$\Delta = \left| \frac{\text{Ліва частина} - \text{Права частина}}{\text{Ліва частина}} \right| \cdot 100\%$$

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань для перевірки законів Кірхгофа

Параметри елементів (вимірні)	Вимірні струми, мА (з урахуванням знаку)	Вимірні напруги на резисторах, В	Напруга між вузлами, В
$E1 = \underline{\quad}$ В	$I1 = \underline{\quad}$	$U_{R1} = \underline{\quad}$	$U_{ab} = \underline{\quad}$
$E2 = \underline{\quad}$ В	$I2 = \underline{\quad}$	$U_{R2} = \underline{\quad}$	
$R1 = \underline{\quad}$ Ом	$I3 = \underline{\quad}$	$U_{R3} = \underline{\quad}$	
$R2 = \underline{\quad}$ Ом			
$R3 = \underline{\quad}$ Ом			

Таблиця 2.3 – Перевірка законів Кірхгофа (розрахунки)

Закони	Рівняння	Підстановка значень (ліва частина = права частина)	Похибка, %
1-й ЗК (вузол а)	$\Sigma I = 0$	$\underline{\quad} = \underline{\quad}$	
2-й ЗК (лівий контур)	$\Sigma E = \Sigma IR$	$\underline{\quad} = \underline{\quad}$	
2-й ЗК (правий контур)	$\Sigma E = \Sigma IR$	$\underline{\quad} = \underline{\quad}$	

## 6. Індивідуальні завдання

Таблиця 2.4 – Індивідуальні завдання згідно варіантів

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
R1, Ом	100	220	330	1000	470	100	510	220
R2, Ом	220	100	330	510	1000	100	200	470
R3, Ом	330	470	330	1000	220	100	510	100
E1, В	5	12	9	15	10	5	12	24
E2, В	10	5	9	10	15	5	24	12
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
R1, Ом	1500	680	1000	470	330	200	820	330
R2, Ом	1000	330	2200	470	100	200	1000	1000
R3, Ом	1500	820	1000	220	1000	200	680	100
E1, В	15	10	9	12	5	15	24	7
E2, В	15	5	12	9	12	5	24	12

## 7. Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Схеми електричні принципові досліджуваних кіл (рис. 2.1 та рис. 2.2).
3. Таблиці з результатами вимірювань та розрахунків (табл. 2.1, 2.2, 2.3).
4. Графік ВАХ резистора  $I(U)$  до завдання п.5.1.
5. Розрахунки похибок.
6. Висновки по роботі, в яких зазначити, чи підтвердились експериментально закони Ома та Кірхгофа, та проаналізувати причини виникнення похибок.

## 8. Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола та для повного кола. У чому їх принципова різниця?
2. Що таке електричний вузол, гілка, контур? Покажіть їх на схемі лабораторної роботи.
3. Сформулюйте перший закон Кірхгофа. Яке правило знаків при цьому використовується?
4. Сформулюйте другий закон Кірхгофа. Поясніть правила знаків для ЕРС та спадків напруг при записі рівнянь.
5. Що таке лінійний електричний елемент? Як виглядає його вольт-амперна характеристика?
6. Як експериментально визначити внутрішній опір джерела ЕРС?
7. У чому різниця між ЕРС джерела та напругою на його затискачах? Коли вони рівні?
8. Як впливає внутрішній опір амперметра та вольтметра на точність вимірювань у цій лабораторній роботі? Як ідеально мають виглядати ці опори?
9. Якщо при вимірюванні струму цифровий мультиметр показує знак «мінус», про що це свідчить?
10. Чи виконуються закони Кірхгофа для кіл змінного струму?
11. Скільки незалежних рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа можна скласти для схеми на Рисунку 2?
12. Що таке потенціал точки електричного кола? Як виміряти потенціали вузлів схеми відносно обраної точки заземлення?

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ОМА У КОЛАХ ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ

### 1. Мета роботи

Експериментально перевірити закон Ома для кіл змінного струму з послідовним з'єднанням  $RL$  та  $RC$ . Навчитися будувати векторні діаграми напруг та трикутники потужностей. Визначити повну, активну та реактивну потужності, а також коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ). Провести порівняльний аналіз експериментальних та теоретичних даних, розрахувати відносні похибки вимірювань та визначити параметри реальної котушки індуктивності.

### 2. Теоретичні відомості

У колах змінного синусоїдального (гармонічного) струму закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{U}{Z},$$

де:  $I$  – діюче значення струму (А);  $U$  – діюче значення напруги на застискачах кола (В);  $Z$  – повний опір (імпеданс) кола (Ом).

#### 2.1. Послідовне з'єднання $R$ та $L$ елементів

Для кола з послідовно з'єднаними резистором  $R$  та котушкою індуктивності  $L$ , повний опір визначається формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

де  $X_L = \omega L = 2\pi fL$  – індуктивний опір.

У такому колі напруга на індуктивності випереджає струм на кут  $90^\circ$ , а напруга на резисторі співпадає за фазою зі струмом. Загальний зсув фаз  $\varphi$  між вхідною напругою та струмом визначається як:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

#### 2.2. Послідовне з'єднання $R$ та $C$ елементів

Для кола з послідовно з'єднаними резистором  $R$  та конденсатором  $C$ , повний опір дорівнює:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

де  $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$  – ємнісний опір.

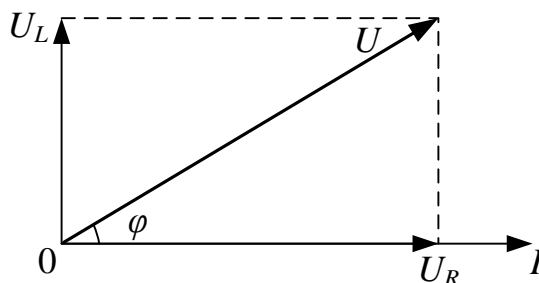


Рисунок 3.1 – Вектори напруг при послідовному RL-з'єднанні

У RC-колі напруга на ємності відстає від струму на кут  $90^\circ$ . Зсув фаз  $\varphi$  (від'ємний, оскільки напруга відстає від струму):

$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{X_C}{R}\right)$$

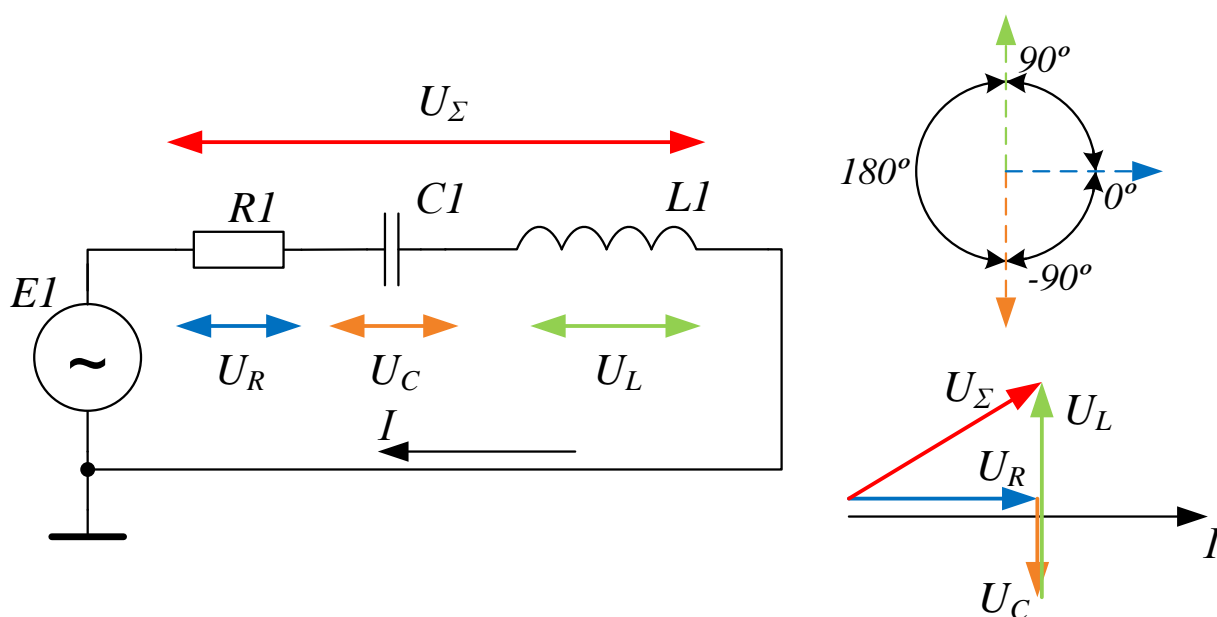


Рисунок 3.2 – Вектори напруг при послідовному RLC-з'єднанні

### 2.3. Потужність у колі змінного струму

У колах змінного струму розрізняють три види потужності:

1. Повна потужність ( $S$ ) – характеризує загальне енергетичне навантаження на джерело. Вимірюється у вольт-амперах ( $V \cdot A$ ):

$$S = UI = ZI^2$$

2. Активна потужність ( $P$ ) – характеризує незворотне перетворення електричної енергії в інші види (тепло, світло, механічну роботу). Виділяється лише на активному опорі  $R$ . Вимірюється у ватах (Вт):

$$P = UI \cos \varphi = RI^2$$

3. Реактивна потужність ( $Q$ ) – характеризує обмін енергією між джерелом та реактивними елементами (індуктивністю та ємністю) без її незворотного споживання. Вимірюється у вольт-амперах реактивних (Var):

○ Для індуктивності:  $Q_L = U_L I = I^2 X_L$  (додатна)

○ Для ємності:  $Q_C = U_C I = I^2 X_C$  (від'ємна)

Трикутник потужностей пов'язує ці величини:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) показує, яка частка повної потужності є активною:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}$$

#### 2.4. Реальна котушка індуктивності

У реальному експерименті котушка індуктивності не є ідеальною. Вона має власний активний опір дроту обмотки  $R_{кот}$ . Тому реальне  $RL$ -коло складається з зовнішнього резистора  $R_{зовн}$  та параметрів котушки  $L$  та  $R_{кот}$ .

Повний активний опір кола:  $R_{\Sigma} = R_{зовн} + R_{кот}$ .

Напруга на реальній котушці  $U_{L,реал}$  вимірюється вольтметром і включає падіння напруги на її активному та індуктивному опорах:

$$U_{L,реал} = I \sqrt{R_{кот}^2 + X_L^2}$$

*Примітка: У даній лабораторній роботі для спрощення первинних розрахунків (п. 4.1) ми вважатимемо котушку ідеальною ( $R_{кот} \approx 0$ ), якщо викладачем не вказано виміряти її опір мультиметром перед початком роботи.*

#### 2.5 Оцінювання похибок

Для оцінки якості експерименту розраховується відносна похибка між експериментальним ( $A_{експ}$ ) та теоретичним ( $A_{теор}$ ) значенням величини  $A$ :

$$\Delta A = \left| \frac{A_{\text{експ}} - A_{\text{теор}}}{A_{\text{теор}}} \right| \cdot 100\%$$

Зазвичай допустимою вважається похибка до 5-10%, яка зумовлена класом точності приладів та неідеальністю елементів.

### 3. Опис лабораторної установки та електричних схем

Для виконання роботи використовується джерело змінної напруги (генератор синусоїдальних сигналів), магазин опорів, магазин ємностей, котушка змінної індуктивності, амперметр та вольтметр (мультиметри).

Схеми електричні принципові:

1. Згідно рисунку 3.1 до джерела змінної синусоїдальної напруги послідовно підключені амперметр ( $PA1$ ), опір ( $R1$ ) та котушка індуктивності ( $L1$ ). Вольтметри підключені наступним чином:  $PV1$  паралельно резистору  $R1$  (вимірює  $U_R$ ),  $PV2$  паралельно котушці  $L1$  (вимірює  $U_L$ ),  $PV3$  паралельно всьому колу відносно затискачів джерела (вимірює загальну  $U$ ).

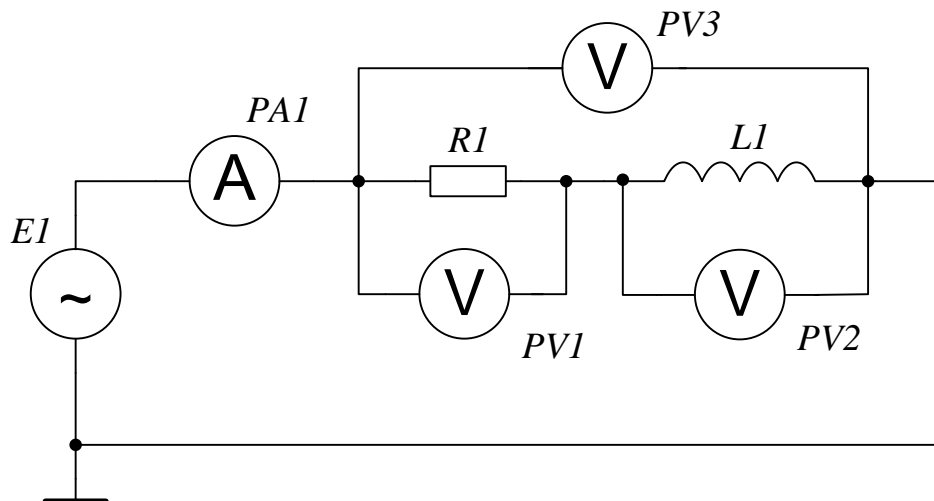


Рисунок 3.1 – Дослідження послідовного  $RL$ -кола

2. Згідно рисунку 3.2 до джерела змінної напруги послідовно підключені амперметр ( $PA1$ ), опір ( $R1$ ) та магазин ємностей ( $C1$ ). Вольтметри підключені:  $PV1$  паралельно  $R1$  (вимірює  $U_R$ ),  $PV2$  паралельно  $C1$  (вимірює  $U_C$ ),  $PV3$  паралельно всьому колу (вимірює загальну  $U$ ).

### 4. Хід роботи

#### 4.1. Дослідження $RL$ -кола та аналіз похибок

1. Зібрати коло згідно з рис. 3.1. Встановити параметри  $E1$ ,  $f=50$  Гц,  $R$ ,  $L$  згідно з варіантом.

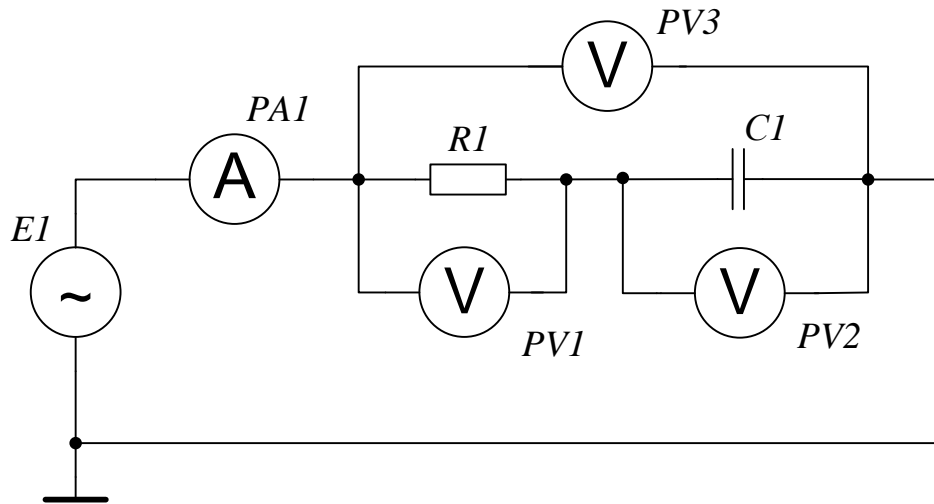


Рисунок 3.2 – Дослідження послідовного  $RC$ -кола

2. Експериментальна частина:

- Увімкнути джерело живлення.
- Виміряти струм  $I_{експ}$  та напруги  $U_{R.експ}$ ,  $U_{L.експ}$ ,  $U_{заг.експ}$ . Занести дані в таблицю 3.1.

3. Розрахункова частина:

- Розрахувати теоретичні значення реактивного опору  $X_L$  та повного опору  $Z_{теор}$ .
- Розрахувати теоретичне значення струму:  $I_{теор} = U / Z_{теор}$ .
- Розрахувати теоретичні падіння напруг:  $U_{R.теор} = I_{теор} \cdot R$ ;  $U_{L.теор} = I_{теор} \cdot X_L$ .
- Визначити експериментальне значення повного опору:  $Z_{експ} = U_{заг.експ} / I_{експ}$ .
- Розрахувати коефіцієнт потужності:  $\cos \varphi_{експ} = U_{R.експ} / U_{заг.експ}$  (або  $\cos \varphi_{експ} = R / Z_{експ}$ ).
- Розрахувати потужності за експериментальними даними: повну  $S = U_{заг.експ} \cdot I_{експ}$ , активну  $P = S \cdot \cos \varphi_{експ}$ , реактивну  $Q_L = \sqrt{S^2 - P^2}$ .

4. Аналіз похибок:

- Розрахувати відносну похибку визначення повного опору  $\Delta Z$  та струму  $\Delta I$ , порівнюючи експериментальні та теоретичні дані.

5. Заповнити таблицю 3.1.

#### 4.2. Дослідження $RC$ -кола та аналіз похибок

1. Зібрати коло згідно з рисунком 3.2. Встановити параметри  $R$ ,  $C$  згідно з варіантом.
2. Експериментальна частина:
  - Виміряти струм  $I_{експ}$  та напруги  $U_{R.експ}$ ,  $U_{C.експ}$ ,  $U_{заг.експ}$ .

3. Розрахункова частина:
  - Виконати аналогічні до п. 4.1 розрахунки для  $X_C$ ,  $Z_{теор}$ ,  $I_{теор}$ ,  $U_{R.теор}$ ,  $U_{C.теор}$ .
  - Розрахувати  $Z_{експ}$ ,  $\cos \varphi$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $Q_C$ .
4. Аналіз похибок:
  - Розрахувати відносні похибки  $\Delta Z$  та  $\Delta I$ .
5. Заповнити таблицю аналогічну таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Приклад таблиці для RL-кола

Параметр	Позначення	Розмірність	Експеримент	Теорія	Похибка $\Delta, \%$
Напруга джерела	$U$	В			-
Струм	$I$	А	$I_{експ}$	$I_{теор}$	
Напруга на резисторі	$U_R$	В	$U_{R.експ}$	$U_{R.теор}$	-
Напруга на індуктивності	$U_L$	В	$U_{L.експ}$	$U_{L.теор}$	-
Повний опір	$Z$	Ом	$Z_{експ}$	$Z_{теор}$	
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	в.о.		-	-
Активна потужність	$P$	Вт		-	-
Реактивна потужність	$Q_L$	вар		-	-
Повна потужність	$S$	В·А		-	-

### 5. Індивідуальні завдання

Таблиця 3.3 – Вихідні дані для експерименту згідно варіантів

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$EI$ , В	12	24	10	15	20	36	12	9
$RI$ , Ом	100	220	50	150	120	330	47	10
$LI$ , мГн	100	200	50	120	250	300	80	30
$CI$ , мкФ	47	22	100	33	10	4,7	68	220
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
$EI$ , В	48	24	18	30	12	220	15	40
$RI$ , Ом	470	180	68	200	82	1000	270	500
$LI$ , мГн	500	150	60	180	90	1200	350	120
$CI$ , мкФ	2,2	15	50	20	40	1	6,8	33

Примітка: У всіх варіантах частота мережі  $f = 50$  Гц,

## 6. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Титульний аркуш.
2. Схеми досліджуваних кіл.
3. Таблиці з вимірними та розрахованими даними (для  $RL$  та  $RC$  кіл окремо).
4. Розрахунки реактивних опорів ( $X_L$ ,  $X_C$ ), повних опорів ( $Z$ ) та кутів зсуву фаз ( $\varphi$ ).
5. Векторні діаграми напруг, побудовані з дотриманням масштабу:
  - Векторна діаграма напруг для  $RL$ -кола.
  - Векторна діаграма напруг для  $RC$ -кола.
  - Трикутник потужностей для  $RL$ -кола.
  - Трикутник потужностей для  $RC$ -кола.

*Для побудови:* Відкласти вектор струму  $I$  горизонтально. Вектор  $U_R$  співпадає з  $I$ . Вектор  $U_L$  випереджає  $I$  на  $90^\circ$ . Вектор  $U_C$  відстає від  $I$  на  $90^\circ$ . Сума векторів має дорівнювати вектору вхідної напруги  $U$ .

6. Висновки щодо виконання закону Ома, пояснення фазових співвідношень та впливу реактивних елементів на фазу струму, оцінка величин похибок.

## 7. Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для кола змінного струму.
2. Що таке повний опір (імпеданс) кола і в яких одиницях він вимірюється?
3. Запишіть формулу для розрахунку індуктивного опору  $X_L$ . Як він залежить від частоти?
4. Запишіть формулу для розрахунку ємнісного опору  $X_C$ . Як він залежить від частоти?
5. Який фазовий зсув між напругою та струмом на чисто активному опорі (резисторів)?
6. Як зсунуті за фазою напруга та струм на ідеальній котушці індуктивності?
7. Як зсунуті за фазою напруга та струм на ідеальному конденсаторі?
8. Як побудувати трикутник напруг для послідовного  $RL$ -кола?
9. Що таке трикутник опорів і як він пов'язаний з трикутником напруг?
10. Чому алгебраїчна сума напруг на елементах  $U_R + U_L$  (або  $U_R + U_C$ ) не дорівнює напрузі джерела  $U$  у колі змінного струму?
11. Як зміниться струм у послідовному  $RL$ -колі, якщо збільшити частоту джерела живлення?
12. Як зміниться струм у послідовному  $RC$ -колі, якщо збільшити ємність конденсатора?
13. Що таке коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) і як його визначити з трикутника опорів?
14. Накресліть векторну діаграму для кола, що містить  $R$ ,  $L$  і  $C$  послідовно, при умові  $X_L > X_C$ .

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ ТА ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ

### 1. Мета роботи

Дослідити властивості електричного кола з паралельним та послідовним з'єднанням резистора, котушки індуктивності і конденсатора.

### 2. Хід роботи

#### 2.1. Дослідження паралельного з'єднання $RLC$ елементів

1. Завантажити програму для емуляції електронних кіл (Multisim).
2. В середовищі Multisim зібрати схему по рис. 4.1. Встановити значення параметрів джерела та елементів.

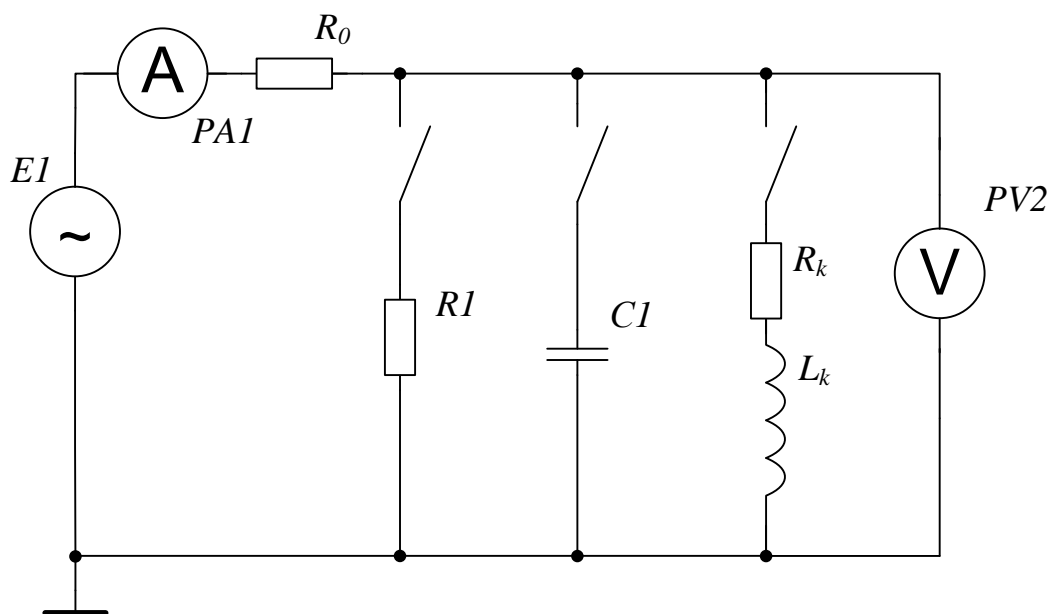


Рисунок 4.1 – Схема віртуального експерименту по дослідженню паралельного з'єднання  $RLC$  елементів

3. Дослідити електричне коло з резистором, для цього натиснути клавішу R на клавіатурі, що зумовить замикання ключа для утворення кола з резистором.

4. Встановити значення його опору резистора згідно індивідуального завдання. Для цього двічі клікнути по його зображенню на схемі, і у вікні, що з'явиться, ввести необхідне значення. Встановити амперметр і вольтметр у режим вимірювання змінного струму, клацнувши двічі по відповідному зображенні на схемі й у вікні властивостей вибрати режим AC.

5. Натиснути клавішу “Activate simulation” у правому верхньому куті екрана й відразу кнопку Pause. Прилади вольтметр і амперметр відповідно покажуть значення напруги і струму на резисторі. Результати експерименту записати у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати дослідження паралельного з’єднання *RLC* елементів

Параметр	Од. вимірювання	Резистор	Котушка індуктивності	Конденсатор	Повне коло
$U$	В				
$I$	А				
$T_2-T_1$	мс				

6. Дослідити електричне коло з котушкою індуктивності. Для цього натиснути клавішу *L* на клавіатурі, що викличе замикання ключа для утворення кола з котушкою.

7. Натиснути клавішу “Activate simulation” у правому верхньому куті екрана й відразу кнопку Pause. Прилади вольтметр і амперметр відповідно покажуть значення напруги і струму на котушці індуктивності. Результати експерименту записати у табл. 4.1.

8. Дослідити електричне коло з конденсатором. Для цього натиснути клавішу *C* на клавіатурі, що спричинить замикання ключа для утворення кола з конденсатором.

9. Натиснути клавішу “Activate simulation” у правому верхньому куті екрана й відразу кнопку Pause. Прилади вольтметр і амперметр відповідно покажуть значення напруги і струму на конденсаторі. Результати експерименту записати у табл. 4.1.

10. Дослідити електричне коло з паралельно увімкненими резистором, котушкою індуктивності і конденсатором. Для цього натиснути по чергово клавіші *R*, *L*, *C* на клавіатурі, що зумовить замикання відповідних ключів у схемі електричного кола.

11. Натиснути клавішу “Activate simulation” у правому верхньому куті екрана й відразу кнопку Pause. Прилади амперметр і вольтметр відповідно покажуть значення струму у вітці з джерелом і напруги на паралельних вітках з елементами *R*, *L*, *C*. Результати експерименту записати у табл. 4.1.

## 2.2. Дослідження послідовного з’єднання *RLC* елементів

1. Схема досліджуваного електричного кола має такий вигляд (рис. 4.2).

2. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Multisim. Для цього необхідно вибрати розділи на панелі інструментів (Sources, Basic, Indicators, Instruments), в яких знаходяться потрібні вам елементи, потім перенести їх на робочу область (клацнути мишею на пот-

рібному елементі і, не відпускаючи кнопки, перенести в потрібне місце схеми). Перенесіть джерело змінної напруги, вольтметр (3 шт.), резистор, конденсатор, котушку індуктивності.

3. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для одержання необхідної вам схеми. З'єднайте елементи  $R1$ ,  $C1$  і  $L1$  послідовно, а вольтметри  $V$  до елементів підключіть паралельно. Для з'єднання двох контактів необхідно клацнути по одному з контактів основною кнопкою миші і, не відпускаючи клавішу, довести курсор до другого контакту.

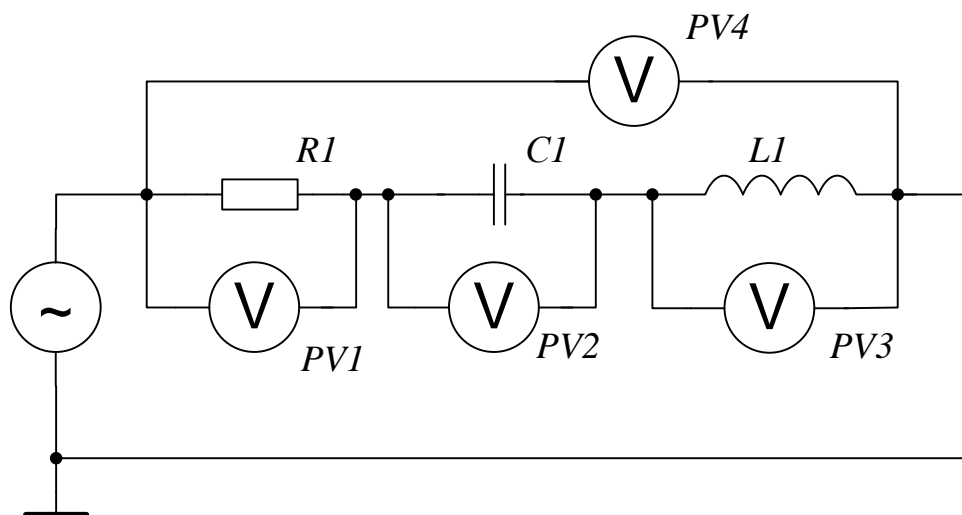


Рисунок 4.2 – Схема досліджуваного електричного кола з послідовним з'єднанням  $RLC$  елементів

4. Встановіть параметри джерела змінної напруги відповідно до варіанта (табл. 4.3), для чого двічі клацніть на зображенні джерела і в вікні, що розкрилося AC Voltage Source Properties виберіть опцію Value. Тут Voltage (V) - діюче значення напруги, встановлюється в вольтах; Frequency (Hz) - частота напруги, одиниця виміру - герц. У вікні Phase залишиться величина 0 градусів.

5. Встановіть параметри елементів кола відповідно до варіанта, для чого двічі клацніть на зображенні елемента і в вікні, що розкрилося, виберіть опцію Value.

6. Встановіть рід роботи вольтметра - вимірювання змінної напруги, для чого двічі клацніть на зображенні вольтметра і в вікні, встановіть Mode - AC. Вольтметр вимірює діюче значення змінної напруги.

7. ЗАВДАННЯ. Увімкніть живлення електричного кола і зніміть показання всіх вольтметрів. Запишіть результат у звіт по лабораторній роботі. Вимкніть живлення.

8. За допомогою векторної діаграми струму і напруги поясніть, чому проста сума напруг на елементах кола не збігається зі значенням встановленого на джерелі напруги.

9. Збільшіть значення частоти змінної напруги в 2 рази. Знову зробіть вимірювання тиску. Побудуйте векторну діаграму струму і напруги. Відмітьте, які зміни відбулися у векторній діаграмі.

10. Розрахуйте за векторними діаграмами величину фазового зсуву між струмом в колі і напругою на її вході.

#### 4. Індивідуальні варіанти

Таблиця 4.2 – Індивідуальні варіанти для схеми паралельного з'єднання  $RLC$  елементів згідно варіанту

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$EI, В$	40	50	60	70	80	40	50	60
$f, Гц$	50	40	60	50	40	60	50	40
$R_0, Ом$	100	120	140	160	180	200	220	240
$RI, Ом$	50	150	250	350	450	550	650	750
$Rk, Ом$	50	55	60	65	70	75	80	85
$Lk, мГн$	10	15	20	25	30	35	40	45
$CI, мФ$	200	250	300	350	400	450	500	150
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
$EI, В$	70	80	40	50	60	70	80	40
$f, Гц$	60	50	40	60	50	40	60	50
$R_0, Ом$	260	280	300	100	120	140	160	180
$RI, Ом$	850	950	100	200	300	400	500	600
$Rk, Ом$	90	95	100	105	110	115	120	125
$Lk, мГн$	50	55	60	65	70	75	80	85
$CI, мФ$	100	175	225	275	325	375	425	125

Таблиця 4.3 – Індивідуальні варіанти для схеми паралельного з'єднання  $RLC$  елементів згідно варіанту

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
$EI, В$	5	10	15	20	100	5	10	15
$f, Гц$	35	40	35	50	35	40	35	50
$RI, ом$	100	80	60	40	20	100	80	60
$LI, мГн$	1	5	10	0,5	0,1	1	5	10
$CI, нФ$	100	150	200	250	300	350	400	450
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
$EI, В$	20	100	5	10	15	20	100	50
$f, Гц$	35	40	35	50	35	40	35	50
$RI, ом$	40	20	100	80	60	40	20	100
$LI, мГн$	0,5	0,1	1	5	10	0,5	0,1	1
$CI, нФ$	500	550	600	650	700	750	800	850

## 5. Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Титульний аркуш.
2. Схеми досліджуваних кіл.
3. Таблиці з вимірними та розрахованими даними (для послідовного і паралельного з'єднання окремо).
4. Векторні діаграми напруг, побудовані з дотриманням масштабу.
5. Осцилограми всіх станів схем.
6. Висновки щодо поведінки напруг.

## 6. Контрольні запитання

1. Як обчислити параметри еквівалентної послідовної заступної схеми, користуючись параметрами паралельних віток?
2. Який режим електричного кола змінного струму називається резонансним?
3. Яка умова резонансу струмів?
4. Як, за показами електровимірювальних приладів, встановити наявність у колі резонансу струмів?
5. Як визначається резонансна частота за паралельного з'єднання віток з котушкою індуктивності та конденсатором?
6. Чи впливає на явище резонансу струмів наявність активного опору у вітці з конденсатором?
7. Яке співвідношення між реактивними потужностями котушки та конденсатора в резонансному режимі?
8. Чому дорівнює струм на вході паралельного електричного контура, яке складається із ідеальної котушки індуктивності та конденсатора?
9. Чому арифметична сума напруг на елементах кола не збігається зі значенням встановленим на джерелі напруги?
10. В якому фазовому співвідношенні знаходяться струм і напруга на ємнісному елементі?
11. У якому фазовому співвідношенні знаходяться струм і напруга на індуктивному елементі?
12. Як впливає збільшення значення частоти змінної напруги на співвідношення струмів і напруг?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ

### 1. Мета роботи

Вивчити фізичні процеси в послідовному коливальному контурі ( $RLC$ -колі). Експериментально дослідити явище резонансу напруг. Побудувати амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) контуру. Дослідити вплив активного опору втрат на добротність контуру та його смугу пропускання.

### 2. Обладнання та програмне забезпечення

Робота може виконуватися на лабораторному стенді або в середовищі моделювання (Multisim).

Необхідні прилади:

1. Генератор сигналів синусоїдальної форми (зі змінною частотою).
2. Осцилограф двоканальний або вольтметри змінного струму.
3. Набір елементів ( $L$ ,  $C$ ,  $R$ ).

### 3. Теоретичні відомості

Послідовний коливальний контур – це електричне коло, що складається з послідовно з'єднаних індуктивності  $L$ , ємності  $C$  та активного опору  $R$ , підключених до джерела змінної напруги.

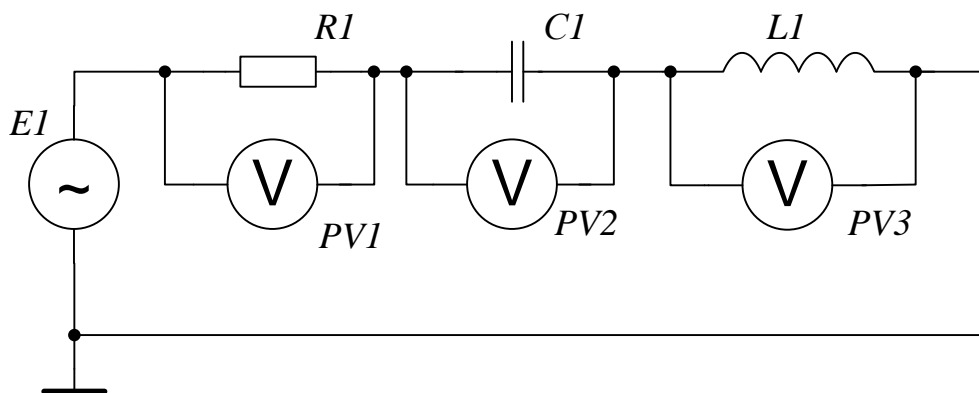


Рисунок 5.1 – Послідовний коливальний  $RLC$ -контур

Резонанс напруг виникає тоді, коли реактивний опір індуктивності дорівнює реактивному опору ємності:

$$X_L = X_C = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

Частота, при якій настає резонанс (резонансна частота), визначається формулою Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Основні властивості послідовного контуру при резонансі:

1. Повний опір контуру  $Z$  стає чисто активним і мінімальним ( $Z = R$ ).
2. Струм у колі досягає максимуму:  $I_0 = \frac{U_{ex}}{R}$ .
3. Напруги на індуктивності  $U_L$  та ємності  $U_C$  рівні за модулем, але протилежні за фазою (зсув  $180^\circ$ ), тому вони компенсують одна одну.
4. Якщо хвильовий опір  $\rho > R$ , то напруги на реактивних елементах значно перевищують вхідну напругу.

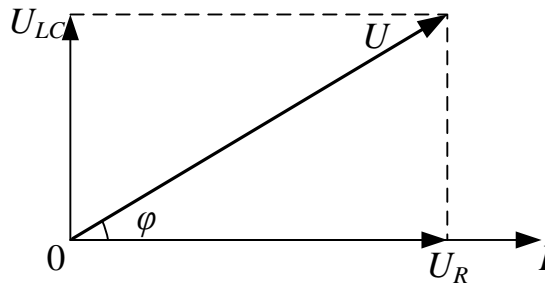


Рисунок 5.2 – Векторна діаграма напруг

Характеристичний опір контуру ( $\rho$ ):

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Добротність контуру ( $Q$ ) показує, у скільки разів напруга на реактивних елементах при резонансі перевищує вхідну напругу:

$$Q = \frac{U_{L0}}{U_{ex}} = \frac{U_{C0}}{U_{ex}} = \frac{\rho}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Смуга пропускання ( $BW$  або  $2\Delta f$ ) – це діапазон частот, у межах якого струм (або напруга на резисторі) зменшується не більше ніж у  $\sqrt{2} = 0.707$  разів від максимального резонансного значення. Зв'язок між добротністю та смугою пропускання:

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{f_0}{Q},$$

де  $f_1$  та  $f_2$  – нижня та верхня граничні частоти (на рівні 0.707).

Чим більший опір втрат  $R$ , тим менша добротність  $Q$ , тим ширша смуга пропускання і тим більш пологою стає резонансна крива.

## 4. Хід роботи

### 4.1. Підготовка та розрахунок

1. Оберіть варіант завдання згідно індивідуального завдання (п.5).
2. Розрахуйте теоретичну резонансну частоту  $f_{0теор}$  та хвильовий опір  $\rho$ .
3. Розрахуйте очікувану добротність  $Q_{теор}$  для двох значень опору ( $R1$  та  $R2$ ).

### 4.2 Експериментальне дослідження (для $R1$ )

1. Зберіть електричне коло послідовного контуру.
2. Встановіть на генераторі напругу  $U_{вх} = 3 \dots 5$  В (амплітуда).
3. Змінюючи частоту генератора, знайдіть резонансну частоту  $f_{0екп}$  за максимумом напруги на резисторі R (відповідає максимуму струму).
4. Зафіксуйте значення  $U_{Rmax}$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  на резонансній частоті. Зніміть АЧХ контуру (залежність  $U_R$  від частоти). Для цього змінійте частоту ліворуч і праворуч від резонансної. Зробіть мінімум 11 вимірювань (5 точок до резонансу, резонанс, 5 точок після). Обов'язково знайдіть частоти  $f_1$  та  $f_2$ , де напруга становить  $0.707 U_{max}$ .
5. Заповніть таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювань

№	Частота $f$ , кГц	Вхідна напруга, $U_{вх}$ , В	Для резистора $R1$ (малий опір)				Для резистора $R2$ (великий опір)			
			$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	$I$ , мА	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	$I$ , мА
1										
2										
...	$f_0 =$		$max =$				$max =$			
...										

Струм розраховується після вимірювань за законом Ома:

$$I = \frac{U_R}{R},$$

де  $R$  – номінал резистора згідно варіанту.

### 4.3 Експериментальне дослідження (для $R2$ )

1. Замініть резистор  $R1$  на резистор  $R2$  (більшого номіналу).
2. Повторіть дії п. 4.2. Зверніть увагу, як змінився максимум напруги та «гострота» піку.

#### 4.4 Обробка результатів

1. Занесіть дані в таблицю вимірювань.
2. Побудуйте на одному графіку дві криві АЧХ:  $U_R(f)$  для  $R1$  та  $R2$ .
3. Визначте експериментальну смугу пропускання  $BW = f_2 - f_1$  для обох випадків.
4. Розрахуйте експериментальну добротність двома методами:
  - За напругами:  $Q_{експ1} = \frac{U_{L0}}{U_{ex}}$ .
  - За частотами:  $Q_{експ2} = \frac{f_0}{BW}$ .
5. Порівняйте теоретичні та експериментальні дані. Заповніть таблицю 5.2. Зробіть висновки.

Таблиця 5.2 – Результати роботи

Параметр	Для $R1$ (малі втрати)		Для $R2$ (великі втрати)	
	Теорія	Експеримент	Теорія	Експеримент
Резонансна частота $f_0$ , Гц				
Напруга на $R$ при резонансі $U_{R0}$ , В				
Напруга на $C$ ( $L$ ) при резонансі $U_{C0}$ , В				
Нижня гранична частота $f_1$ , Гц				
Верхня гранична частота $f_2$ , Гц				
Смуга пропускання $BW$ , Гц				
Добротність $Q$				

#### 5. Індивідуальні завдання

Таблиця 5.3 – Параметри елементів схеми згідно варіантів

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
L, мГн	10	20	5	15	47	22	8	33
C, нФ	100	47	220	68	10	33	150	22
R1, Ом	50	100	20	75	200	120	40	150
R2, Ом	150	300	100	200	600	360	120	450
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
L, мГн	4	100	6.8	50	12	2.2	18	12
C, нФ	330	4.7	200	15	85	470	56	200
R1, Ом	15	300	30	180	60	10	90	48
R2, Ом	50	960	90	500	180	30	270	400

## 6. Контрольні запитання

1. Сформулюйте умову виникнення резонансу напруг у послідовному колі.
2. Як змінюється повний опір послідовного контуру при зміні частоти від 0 до  $\infty$ ?
3. Чому резонанс у послідовному контурі називають резонансом напруг? Чи небезпечно це для обладнання?
4. Що таке характеристичний опір контуру і від чого він залежить?
5. Дайте визначення добротності контуру. Який її фізичний зміст?
6. Як впливає величина активного опору  $R$  на резонансну частоту, добротність та смугу пропускання?
7. Як визначити смугу пропускання контуру за графіком АЧХ?
8. Який фазовий зсув між струмом і входною напругою на резонансній частоті? До неї? Після неї?
9. Чому дорівнює коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) контуру при резонансі?
10. Як зміняться резонансна частота і добротність, якщо індуктивність збільшити в 4 рази, а ємність залишити без змін?
11. Запишіть закон Ома для послідовного контуру в комплексній формі.
12. Що таке розстроювання контуру (абсолютне та відносне)?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ 1-ГО ВИДУ

### 1. Мета роботи

Експериментальне дослідження амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) паралельного коливального контуру. Вивчення впливу внутрішнього опору джерела сигналу (генератора) на вибіркові властивості контуру, його смугу пропускання та добротність.

### 2. Обладнання та програмне забезпечення

1. Лабораторний стенд (середовище моделювання Multisim).
2. Функціональний генератор синусоїдальних сигналів.
3. Електронний осцилограф або вольтметр змінного струму.
4. Набір індуктивностей ( $L$ ), ємностей ( $C$ ) та резисторів ( $R$ ).

### 3. Теоретичні відомості

Паралельний коливальний контур складається з котушки індуктивності  $L$  та конденсатора  $C$ , які увімкнені паралельно джерелу енергії.

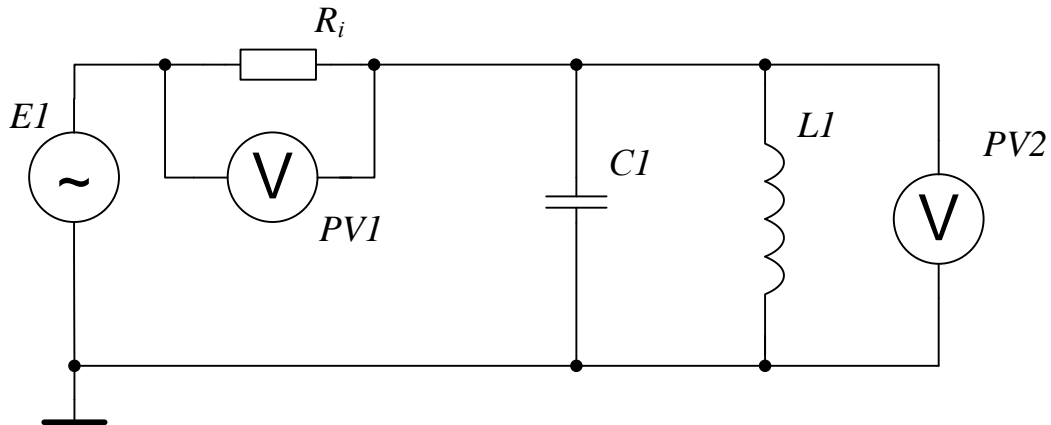


Рисунок 6.1 – Паралельний коливальний контур 1-го виду

У реальних умовах джерело сигналу має внутрішній опір  $R_i$ . Схема дослідження (контур 1-го виду) зазвичай являє собою ділянку напруги, де верхнє плече – це опір генератора  $R_i$  (або додатковий резистор, що імітує його), а нижнє – паралельний контур ( $L1 \parallel C1$ ).

Умова резонансу: резонанс напруг (або струмів, залежно від точки зору, але в даній схемі ми спостерігаємо максимум напруги) настає, коли реактивна провідність індуктивності дорівнює реактивній провідності ємності:

$$\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L}$$

Резонансна частота:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

На резонансній частоті опір ідеального паралельного контуру прямує до нескінченності (у реальному контурі він активний і максимальний:  $R_{екв}$ ). Тому напруга на контурі досягає максимуму.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – це залежність амплітуди вихідної напруги  $U_{вих}$  від частоти  $f$ . Графік має дзвоноподібну форму.

Основні параметри контуру:

1. Хвильовий опір ( $\rho$ ):

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

2. Смуга пропускання ( $BW$  або  $2\Delta f$ ): Це діапазон частот, у межах якого напруга на контурі не падає нижче рівня 0.707 (або  $1/\sqrt{2}$ ) від максимального значення  $U_{max}$ .

$$BW = f_2 - f_1,$$

де  $f_2$  – верхня гранична частота,  $f_1$  – нижня гранична частота.

3. Добротність ( $Q$ ): Характеризує якість вибіркості контуру. Експериментально визначається як:

$$Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

Вплив опору генератора ( $R_i$ ) – паралельний контур шунтується внутрішнім опором генератора. Чим менший опір  $R_i$ , тим сильніше він шунтує контур, зменшуючи його еквівалентну добротність  $Q_{екв}$  і розширюючи смугу пропускання. Для отримання високої добротності опір джерела має бути великим ( $R_i \gg \rho$ ).

#### 4. Хід роботи

1. Складання схеми: Зібрати електричну схему, що складається з послідовно з'єднаних генератора, резистора  $R_i$  та паралельного контуру ( $L$  і  $C$ ) згідно свого варіанту. Підключити вольтметр (або осцилограф) паралельно контуру.

2. Попередній розрахунок. Для вашого варіанту (п.5) розрахувати теоретичну резонансну частоту  $f_0$ .

3. Експеримент №1 (великий опір  $R_{i1}$ ):
- Встановити значення опору генератора  $R_{i1}$ .
  - Змінюючи частоту генератора, знайти частоту, при якій напруга на контурі максимальна  $U_{max}$ . Записати  $f_{рез}$  та  $U_{max}$ .
  - Зняти АЧХ: виміряти напругу на частотах нижче та вище резонансної (мінімум 8-10 точок). Обов'язково знайти частоти  $f_1$  та  $f_2$ , де напруга дорівнює  $0.707 U_{max}$ .
4. Експеримент № 2 (малий опір  $R_{i2}$ ):
- Змінити опір генератора на  $R_{i2}$ .
  - Повторити дії пункту 3.
5. Обробка результатів:
- Побудувати графіки АЧХ для обох випадків на одній координатній площині.
  - Визначити за графіками смугу пропускання  $BW$  та розрахувати добротність  $Q$  для обох випадків.

## 5. Індивідуальні завдання

Таблиця 6.1 – Параметри елементів контуру по варіантах

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
Індуктивність $L1$ , мГн	10	20	47	100	5	15	22	33
Ємність $C1$ , нФ	10	10	4,7	1	22	33	6,8	2,2
$R_{i1}$ , кОм	10	11	12	13	14	15	16	17
$R_{i2}$ , кОм	1	2	1,1	1,5	1,8	0,9	0,8	0,7
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
Індуктивність $L1$ , мГн	4,7	10	50	1	2,2	68	10	15
Ємність $C1$ , нФ	47	22	3,3	100	68	1,5	4,7	2,2
$R_{i1}$ , кОм	10	11	12	13	14	15	16	17
$R_{i2}$ , кОм	0,6	0,5	1	1,5	2	1,75	0,9	0,7

Примітка: для всіх варіантів напруга живлення  $U_{ex} = 5В$ .

## 6. Зміст звіту

1. Назва та мета роботи.
2. Електрична схема дослідження.
3. Розрахунок теоретичної резонансної частоти  $f_0$  та хвильового опору  $\rho$ .
4. Таблиці вимірювань для двох значень  $R_i$ .
5. Графіки АЧХ  $U = F(f)$  для двох значень  $R_i$ .
6. Розрахунок смуги пропускання та добротності за експериментальними даними.

7. Висновки щодо впливу внутрішнього опору генератора на вибіркові властивості контуру (як змінилася форма кривої та ширина смуги при зменшенні  $R_i$ ).

### **7. Контрольні запитання**

1. У чому полягає явище резонансу напруг у паралельному контурі?
2. Як внутрішній опір джерела впливає на АЧХ паралельного контуру?
3. Чому дорівнює опір ідеального та реального паралельного контуру при резонансі?
4. Як зміниться резонансна частота, якщо індуктивність збільшити в 4 рази?
5. Що таке добротність контуру і як вона пов'язана зі смугою пропускання?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ 2-ГО і 3-ГО ВИДІВ

### 1. Мета роботи

Експериментальне дослідження частотних характеристик паралельних коливальних контурів, що містять втрати в індуктивній (2-й вид) та ємнісній (3-й вид) гілках. Вивчення впливу опору втрат на резонансну частоту, еквівалентний опір, смугу пропускання та добротність контуру.

### 2. Обладнання та засоби

1. Лабораторний макет або симулятор (Multisim).
2. Генератор синусоїдальних сигналів.
3. Вольтметр змінного струму або осцилограф.
4. Магазин опорів (або змінні резистори) для імітації втрат ( $R_L$ ,  $R_C$ ).
5. Елементи контуру ( $L$ ,  $C$ ) та обмежувальний резистор джерела  $R_i$ .

### 3. Теоретичні відомості

Реальні коливальні контури завжди мають втрати енергії. Залежно від того, де зосереджені ці втрати, розрізняють контури 1-го, 2-го та 3-го видів.

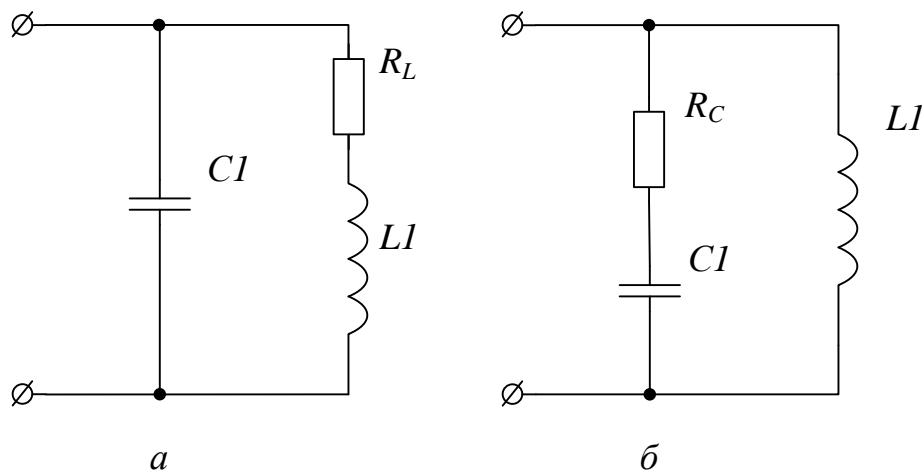


Рисунок 7.1 – Схеми електричні принципи паралельних коливальних контурів 2 (а, втрати в котушці індуктивності) і 3 (б, втрати в конденсаторі) виду

#### 3.1 Паралельний контур 2-го виду

В цьому контурі втрати зосереджені в котушці індуктивності (активний опір дроту). Найбільш типовий випадок, оскільки реальні котушки завжди мають активний опір дроту.

Схема заміщення: ідеальний конденсатор  $CI$  увімкнено паралельно до гілки, що містить послідовно з'єднані індуктивність  $LI$  та резистор втрат  $R_L$ .

Основні формули (при  $Q \gg 1$ ):

1. Резонансна частота: Практично збігається з власною частотою контуру:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{CL} - \left(\frac{R_L}{L}\right)^2}.$$

2. Добротність ( $Q$ ): Визначається відношенням хвильового опору до опору втрат:

$$Q = \frac{w_0 L}{R_L} = \frac{\rho}{R_L}.$$

3. Еквівалентний резонансний опір ( $R_{e0}$ ):

$$R_{e0} = Q \cdot \rho = \frac{L}{CR_L}.$$

### 3.2 Паралельний контур 3-го виду

Втрати зосереджені в конденсаторі (діелектричні втрати або витік). Ця схема моделює ситуацію, коли конденсатор має великі діелектричні втрати, або коли ми штучно вносимо затухання в ємнісну гілку.

Схема заміщення: ідеальна котушка  $LI$  увімкнена паралельно до гілки, що містить послідовно з'єднані ємність  $CI$  та резистор втрат  $R_C$ .

Основні формули:

1. Добротність ( $Q$ ):

$$Q = \frac{1}{w_0 CR_C} = \frac{\rho}{R_C}.$$

2. Вплив втрат: Збільшення опорів  $R_L$  (для 2-го виду) або  $R_C$  (для 3-го виду) призводить до зменшення добротності  $Q$ , розширення смуги пропускання  $BW$  та зменшення амплітуди напруги на резонансі.

## 4. Хід роботи

### 4.1. Дослідження контуру 2-го виду (втрати в котушці)

1. Зібрати схему: генератор  $\rightarrow R_i$  (обмежувальний резистор, взяти 10-20 кОм)  $\rightarrow$  контур (гілка 1:  $CI$ ; гілка 2:  $LI + R_L$ ).

2. Встановити елементи  $LI$  та  $CI$  згідно з варіантом. Встановити малий опір втрат  $R_L$ .

3. Розрахувати теоретичну резонансну частоту  $f_0$ .

4. Змінюючи частоту генератора поблизу розрахованої  $f_0$ , знайти частоту, при якій напруга на контурі максимальна. Це експериментальна  $f_{0exp}$ .

5. Зняти АЧХ контуру  $U = F(f)$ , знайшовши резонансну частоту та межі смуги пропускання (рівень  $0.707 U_{max}$ ). Виміряти напругу на контурі на резонансній частоті, а також у 8-10 точках ліворуч та праворуч від резонансу (особливо ретельно в точках, де напруга падає до рівнів  $0.707$  від максимуму).

6. Збільшити опір втрат до  $R_L$ . Повторити вимірювання.

### 4.2. Дослідження контуру 3-го виду (втрати в конденсаторі)

1. Зібрати схему: генератор  $\rightarrow R_i \rightarrow$  контур (гілка 1:  $LI$ ; гілка 2:  $CI + R_C$ ). Перенести резистор втрат. Тепер резистор  $R_C$  увімкнути послідовно з конденсатором. Котушку вважати ідеальною (або з малим нехтуваним опором).

2. Встановити малий опір втрат  $R_C$ .

3. Розрахувати теоретичну резонансну частоту  $f_0$ .

4. Зняти АЧХ контуру.

5. Збільшити опір втрат  $R_C$  до високого рівня. Повторити вимірювання.

### 4.3. Обробка результатів

1. Побудувати графіки АЧХ для всіх досліджених випадків.

2. За графіками визначити:

- Резонансну частоту  $f_{0exp}$ .
- Максимальну напругу  $U_{max}$ .
- Смугу пропускання  $BW$  (на рівні  $0.707 U_{max}$ ).

3. Розрахувати експериментальну добротність:

$$Q = \frac{f_0}{BW}.$$

4. Розрахувати теоретичну добротність:

$$Q = \frac{1}{R_{loss}} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

5. Занести результати в зведену таблицю та порівняти теорію з практикою.

## 6. Індивідуальні завдання

Для всіх варіантів прийняти внутрішній опір генератора  $R_i = 10\text{-}20$  кОм (для забезпечення режиму джерела струму, щоб  $R_i$  не шунтував контур занадто сильно). Вхідна напруга генератора для всіх варіантів:  $EI = 5$  В.

Таблиця 7.1 – Параметри елементів контуру по варіантах

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
Індуктивність $LI$ , мГн	10	20	5	47	100	10	15	22
Ємність $CI$ , нФ	10	10	20	4,7	1,0	22	33	6,8
$R_{loss}$ , Ом (малі втрати)	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_{loss}$ , Ом (великі втрати)	50	55	60	65	70	75	80	85
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
Індуктивність $LI$ , мГн	33	4,7	50	1,0	2,2	68	10	47
Ємність $CI$ , нФ	2,2	47	3,3	100	68	1,5	4,7	22
$R_{loss}$ , Ом (малі втрати)	5	6	7	8	9	10	11	6
$R_{loss}$ , Ом (великі втрати)	90	95	100	95	90	85	80	100

## 7. Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Електричні схеми паралельних коливальних контурів 2 і 3 згідно індивідуального завдання.
3. Розрахунок теоретичної резонансної частоти  $f_0$  та хвильового опору  $\rho$ .
4. Таблиці з результатами вимірювань для двох значень втрат для обох експериментів.
5. Графіки АЧХ  $U = F(f)$  для двох значень  $R_i$ .
6. Розрахунок смуги пропускання та добротності за експериментальними даними.
7. Висновки щодо впливу втрат в контурів на добротність та смугу пропускання.

## 8. Контрольні запитання

1. Дайте визначення паралельному коливальному контуру 2-го виду. Намалюйте його схему.
2. Дайте визначення паралельному коливальному контуру 3-го виду. Намалюйте його схему.
3. Як зміниться резонансна частота контуру 2-го виду при значному збільшенні активного опору котушки  $R_L$ ?
4. Запишіть формулу для розрахунку добротності контуру, якщо відомі  $L$ ,  $C$  та опір втрат в котушці  $R_L$ .
5. Як впливає збільшення втрат у контурі (зростання  $R_L$  або  $R_C$ ) на амплітуду вихідної напруги при резонансі?
6. Що таке еквівалентний резонансний опір контуру і як він залежить від втрат?
7. Як пов'язані добротність контуру та ширина його смуги пропускання?
8. Яка умова резонансу струмів у розгалуженому ланцюзі (через провідності)?
9. Чому в реальних радіотехнічних котушках добротність залежить від частоти?
10. Побудуйте векторну діаграму струмів і напруг для контуру 2-го виду на момент резонансу.
11. Дайте визначення резонансу струмів. Яка умова виникнення резонансу в паралельному контурі?
12. Як змінюється реактивна провідність індуктивності та ємності при зміні частоти?
13. Що таке характеристичний опір контуру  $\rho$  і від чого він залежить?
14. Дайте визначення добротності паралельного контуру. Який фізичний зміст цього параметра?
15. Як впливає збільшення активного опору втрат у контурі на його резонансну частоту та амплітуду напруги при резонансі?
16. Як пов'язані між собою добротність та смуга пропускання контуру?
17. Чому при дослідженні АЧХ паралельного контуру його необхідно підключати до джерела сигналу через великий опір (імітувати джерело струму)?
18. В чому полягає принципова відмінність між контурами 2-го та 3-го видів з точки зору імпедансу на дуже високих частотах?
19. Як визначити добротність контуру за графіком його АЧХ?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРІВ НИЖНІХ І ВЕРХНІХ ЧАСТОТ

### 1. Мета роботи

Вивчити принцип дії та схемотехніку пасивних  $RC$ -фільтрів нижніх (ФНЧ) та верхніх (ФВЧ) частот. Експериментально дослідити амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) фільтрів. Навчитися визначати частоту зрізу експериментальним та розрахунковим шляхом.

### 2. Обладнання та засоби

- Лабораторний макет і середовище моделювання (Multisim).
- Генератор синусоїдальних сигналів.
- Осцилограф (або вольтметр змінного струму).
- Набір резисторів та конденсаторів (згідно з варіантом).

### 3. Теоретичні відомості

Електричний фільтр – це чотирьополосник, який пропускає сигнали певних частот з малим затуханням (смуга пропускання) і затримує сигнали інших частот (смуга затримування).

Основними характеристиками фільтра є:

- Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ): Залежність коефіцієнта передачі по напрузі  $K(f)$  від частоти:

$$K = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$$

- Частота зрізу ( $f_{зр}$ ): Частота, на якій коефіцієнт передачі зменшується в  $\sqrt{2}$  разів (до рівня 0.707) відносно максимального значення (або на -3 дБ).

#### 3.1. Фільтр нижніх частот (ФНЧ)

ФНЧ пропускає сигнали низьких частот і послаблює високі. Найпростіший пасивний ФНЧ складається з послідовно з'єднаного резистора  $R1$  та конденсатора  $C1$ , з якого знімається вихідна напруга.

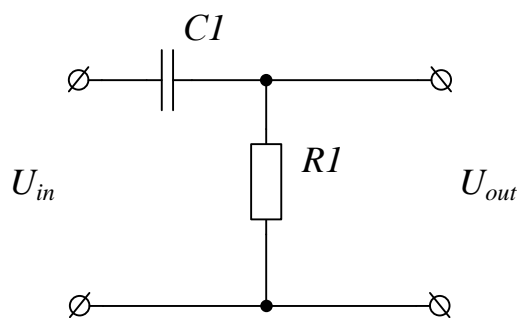


Рисунок 8.1 –  $RC$ -фільтр нижніх частот

Частота зрізу для RC-ланцюга визначається формулою:

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

### 3.2. Фільтр верхніх частот (ФВЧ)

ФВЧ пропускає сигнали високих частот і послаблює низькі. У цій схемі конденсатор  $C1$  увімкнено послідовно, а вихідна напруга знімається з резистора  $R1$ .

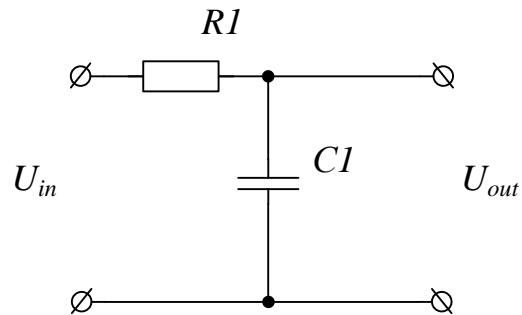


Рисунок 8.2 – RC-фільтр верхніх частот

Аналогічно до ФНЧ, частота зрізу визначається як:

$$f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}.$$

### 3.3. Графічне зображення АЧХ

Нижче наведено типовий вигляд характеристик для ідеальних та реальних фільтрів.

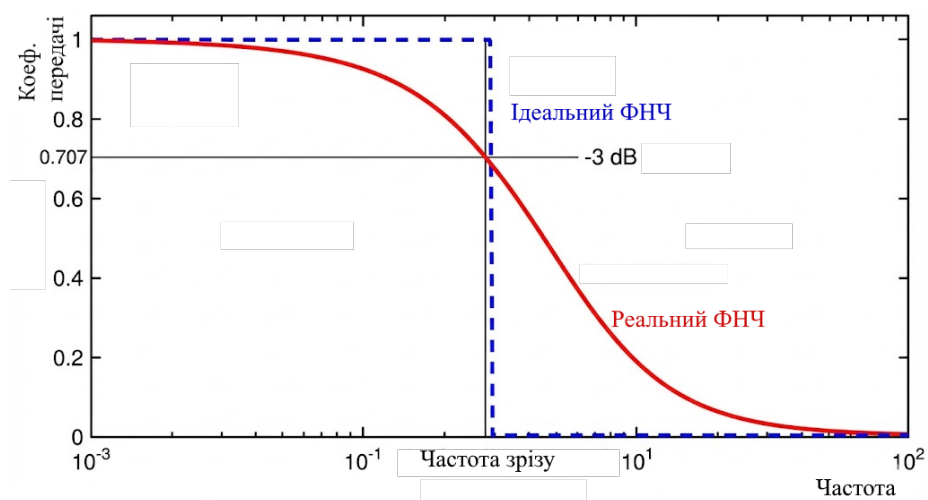


Рисунок 8.3 – АЧХ ФНЧ, залежність коефіцієнту передачі  $K(f)$

Ідеальний ФНЧ (синя пунктирна лінія на рис. 8.3) – це теоретична абстракція (т.з. «цегляна стіна»). Смуга пропускання ( $f < f_{зр}$ ) – діапазон частот, при яких коефіцієнт передачі точно дорівнює 1. Сигнал проходить без змін. Точка переходу ( $f = f_{зр}$ ) – це миттєвий стрибок від 1 до 0. Смуга затримування ( $f > f_{зр}$ ) – діапазон частот, при яких коефіцієнт передачі точно дорівнює 0. Сигнал повністю придушується.

Реальний RC ФНЧ 1-го порядку (червона суцільна лінія на рис. 8.3) – це те, що ми отримуємо на практиці, використовуючи один резистор і один конденсатор. Особливості: плавний перехід, без різкого стрибка. Перехід від пропускання до затримування відбувається поступово. Смуга пропускання на низьких частотах  $K \approx 1$ , але дещо менше одиниці в міру наближення до  $f_{зр}$ . На частоті зрізу ( $f_{зр}$ ) коефіцієнт передачі падає до значення  $1 / \sqrt{2} \approx 0,707$ . У логарифмічному масштабі це відповідає падінню на -3 дБ. Це стандартне визначення межі смуги пропускання. Смуга затримування після  $f_{зр}$  АЧХ спадає. Для фільтра 1-го порядку швидкість спаду становить -20 дБ на декаду (тобто при збільшенні частоти в 10 разів сигнал послаблюється в 10 разів по напрузі).

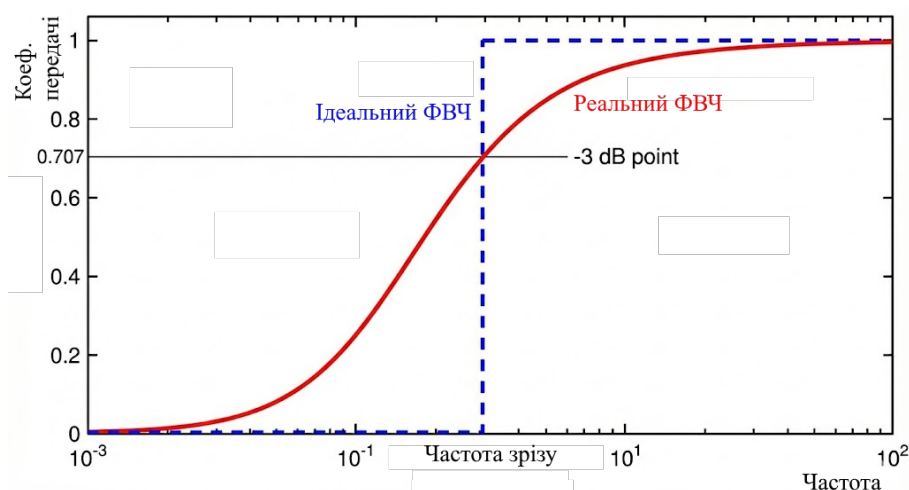


Рисунок 8.4 – АЧХ ФВЧ, залежність коефіцієнту передачі  $K(f)$

Ідеальний ФВЧ (синя пунктирна лінія на рис. 8.4) – це теоретична «цегляна стіна». Смуга затримування ( $f < f_{зр}$ ) при якій коефіцієнт передачі точно дорівнює 0. Точка переходу ( $f = f_{зр}$ ) – це миттєвий стрибок від 0 до 1. Смуга пропускання ( $f > f_{зр}$ ) – при якій коефіцієнт передачі точно дорівнює 1.

Реальний RC ФВЧ 1-го порядку (червона суцільна лінія на рис. 8.4) – реальна фізична реалізація фільтру, яка має смугу затримування, при якій на дуже низьких частотах  $K \approx 0$ . Зі зростанням частоти коефіцієнт передачі плавно зростає. Нахил зростання становить +20 дБ на декаду. На частоті зрізу ( $f_{зр}$ ) так само, як і у ФНЧ, коефіцієнт передачі досягає значення 0,707 (-3 дБ). Смуга пропускання на частотах вище  $f_{зр}$  крива поступово вирівнюється і наближається до  $K = 1$  (0 дБ).

## 4. Хід роботи

### 4.1. Дослідження фільтра нижніх частот (ФНЧ)

1. Зібрати схему ФНЧ (інтегруюче  $RC$ -коло) з елементами згідно з вашим варіантом (табл. 8.1).

2. Підключити до входу генератор синусоїдальних сигналів, а до виходу – осцилограф (або вольтметр).

3. Встановити на генераторі амплітуду вхідного сигналу  $U_{вх} = 5-10$  В. *Важливо:* підтримувати  $U_{вх}$  незмінною протягом усього дослідження.

4. Змінюючи частоту генератора від 10 Гц до 100 кГц (або значень, що перекривають розрахункову частоту зрізу), виміряти вихідну напругу  $U_{вих}$ . Зробити 15-20 вимірів. Обов'язково знайти точку, де  $U_{вих} = 0,707 \cdot U_{вх}$ .

5. Занести дані в таблицю вимірювань.

Таблиця 8.1 – Результати вимірювання дослідження ФНЧ

№	$f$ , Гц	$U_{вх}$ , В	$U_{вих}$ , В	$K = U_{вих} / U_{вх}$
1				
2				
...				

### 4.2. Дослідження фільтра верхніх частот (ФВЧ)

1. Зібрати схему ФВЧ (диференціююче  $RC$ -коло) з тими ж номіналами елементів.

2. Повторити процедуру вимірювання АЧХ (п. 3-5 із завдання 4.1).

3. Занести дані в аналогічну до таб. 8.1 таблицю.

### 4.3 Обробка результатів

1. Розрахувати теоретичне значення частоти зрізу  $f_{зр}$  за формулою для свого варіанту.

2. Побудувати графіки АЧХ ( $K$  від  $f$ ) для ФНЧ та ФВЧ в одній системі координат. Рекомендовано використовувати логарифмічний масштаб для осі частот.

3. За графіками визначити експериментальне значення частоти зрізу (рівень 0.707).

4. Розрахувати абсолютну та відносну похибку визначення частоти зрізу:

$$\delta = \left| \frac{f_{теор} - f_{експ}}{f_{теор}} \right| \cdot 100\%$$

## 5. Індивідуальні завдання

Таблиця 8.1 – Параметри елементів контуру по варіантам

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
Опір $R$ , кОм	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	5,6	10,0	1,0
Ємність $C$ , нФ	100	100	68	47	33	22	10	47
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
Опір $R$ , кОм	2,2	3,3	4,7	5,1	6,8	8,2	1,2	1,6
Ємність $C$ , нФ	22	10	33	15	4,7	68	47	61

## 6. Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Електричні схеми ФНЧ і ФВЧ згідно індивідуального завдання .
3. Розрахунок теоретичної резонансної частоти  $f_0$  та хвильового опору  $\rho$ .
4. Таблиці з результатами вимірювань для різних частот
5. Графіки АЧХ  $U = F(f)$ .
6. Розрахунок значення частоти зрізу та похибок.

## 7. Контрольні питання

1. Що таке електричний фільтр і які його основні типи?
2. Дайте визначення частоті зрізу. Чому обрано рівень 0.707?
3. Як зміниться частота зрізу ФНЧ, якщо опір резистора збільшити вдвічі?
4. Нарисуйте схему пасивного  $RC$ -фільтра верхніх частот.
5. Нарисуйте схему пасивного  $RC$ -фільтра нижніх частот.
6. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт передачі фільтра? Що таке децибел?
7. Як виглядає ідеальна АЧХ для ФНЧ та чим вона відрізняється від реальної?
8. Чому на високих частотах конденсатор «шунтує» сигнал у схемі ФНЧ?
9. Як впливає номінал ємності конденсатора на смугу пропускання ФВЧ?
10. Що таке смуга пропускання та смуга затримання?
11. Як визначити фазовий зсув між вхідною та вихідною напругою на частоті зрізу?

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ТА ФОРМИ ВИХІДНИХ ІМПУЛЬСІВ

### 1. Мета роботи

Вивчити фізичні процеси в  $RC$ -колах при дії на вході періодичної послідовності прямокутних імпульсів. Експериментальне дослідження форми вихідних імпульсів при різних співвідношеннях тривалості імпульсів та сталої часу кола  $\tau$ . Навчитися розрізняти інтегруючі та диференціюючі кола.

### 2. Обладнання та засоби

- Персональний комп'ютер з встановленим пакетом моделювання (Multisim) або лабораторний стенд.
- Генератор прямокутних імпульсів.
- Осцилограф.
- Набір резисторів та конденсаторів.

### 3. Теоретичні відомості

Перехідні процеси виникають при будь-якій зміні режиму роботи електричного кола (комутації). У цій роботі розглядається найпростіше  $RC$ -коло першого порядку. Основним параметром, що характеризує інерційність кола, є стала часу  $\tau$ . Для послідовного  $RC$ -кола вона визначається як:

$$\tau = RC,$$

де:  $R$  – опір резистора (Ом),  $C$  – ємність конденсатора (Ф),  $\tau$  вимірюється в секундах (с).



Рисунок 9.1 – Схема  $RC$ -кола інтегруючого типу

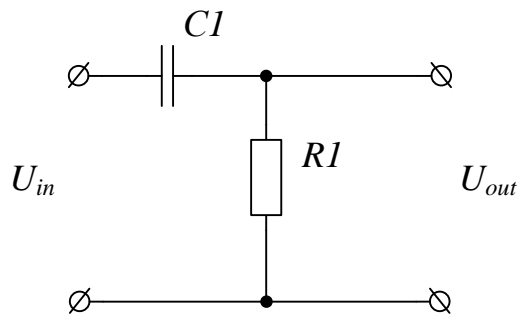


Рисунок 9.2 – Схема RC-кола диференціюючого типу

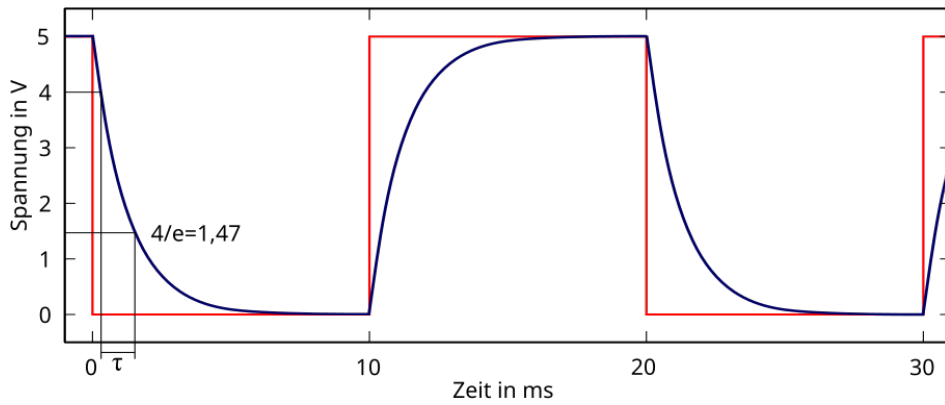


Рисунок 9.3 – Спотворення вхідного сигналу інтегруючим колом (червоний – вхідний, синій – вихідний)

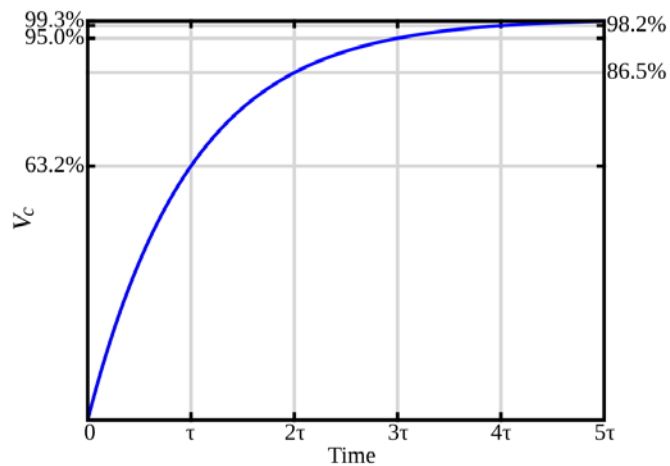


Рисунок 9.4 – Реакція інтегруючого кола на фронт імпульсу напруги

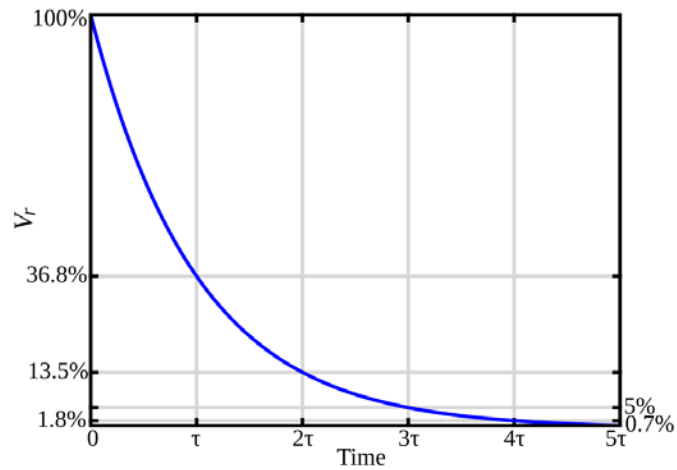


Рисунок 9.5 – Реакція диференціюючого кола на фронт імпульсу напруги

Реакція кола на прямокутний імпульс. Нехай на вхід подається прямокутний імпульс тривалістю  $t_u$ . Залежно від співвідношення  $\tau$  і  $t_u$ , форма вихідного сигналу суттєво змінюється.

Рівняння напруги на конденсаторі під час заряду:

$$U_C(t) = U_{in} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Рівняння напруги на резисторі (струм у колі):

$$U_R(t) = U_{in} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Основні режими роботи  $RC$ -кола:

1.  $\tau \ll t_u$  (мала стала часу):
  - Конденсатор встигає повністю зарядитися і розрядитися за час дії імпульсу.
  - Якщо вихід знімається з резистора ( $U_{out} = U_R$ ), коло працює як диференціююче – вкорочує імпульси, перетворюючи їх на гострі піки.
  - Форма імпульсів різко спотворена.
2.  $\tau \gg t_u$  (велика стала часу):
  - Конденсатор не встигає зарядитися до амплітудного значення. Напруга зростає лінійно.
  - Якщо вихід знімається з конденсатора ( $U_{out} = U_C$ ), коло працює як інтегруюче – згладжує імпульси, перетворюючи прямокутник на «пилку».
3.  $\tau \approx t_u$  (порівнянні величини):
  - Спостерігається класичний експоненціальний перехідний процес.

## 4. Хід роботи

Робота виконується у середовищі схемотехнічного моделювання (наприклад, NI Multisim) або на лабораторному стенді.

### 4.1 Підготовка та розрахунки

1. Згідно індивідуального варіанту (п.5) отримайте значення  $R1$ ,  $C1$  та частоту  $f$ .
2. Розрахуйте період проходження імпульсів  $T = 1/f$  та тривалість імпульсу  $t_u = T/2$  (для меандру).
3. Розрахуйте теоретичну сталу часу кола.
4. Занесіть розрахункові дані у таблицю 9.1.

Таблиця 9.1 – Вихідні дані та попередні розрахунки (заповнюється перед початком експериментів згідно з варіантом)

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Амплітуда вхідних імпульсів	$U_{in}$	5	В
Частота імпульсів	$f$		кГц
Розрахунковий період	$T$		мкс
Тривалість імпульсу	$t_u$		мкс
Опір (базовий)	$R1$		кОм
Ємність (базова)	$C1$		нФ
Розрахункова стала часу	$\tau$		мкс

### 4.2 Дослідження інтегруючого RC-кола (знімаємо сигнал з конденсатора $C1$ ). Визначення здатності кола накопичувати заряд.

1. Зберіть схему: послідовно з'єднайте джерело імпульсної напруги, резистор  $R1$  та конденсатор  $C1$ .
2. Підключіть осцилограф:
  - Канал 1 (Ch1): до виходу генератора (вхідна напруга).
  - Канал 2 (Ch2): паралельно конденсатору  $C1$  (вихідна напруга  $U_C$ ).
  - *Важливо:* «Земля» осцилографа та генератора мають бути з'єднані в одній точці.
3. Дослід №1 (нормальний режим,  $\tau \approx t_u$ ):
  - Встановіть задані варіантом номінали  $R1$  та  $C1$ .
  - Налаштуйте розгортку осцилографа так, щоб на екрані було видно 1-2 періоди сигналу.
  - Зафіксуйте форму сигналу на осцилограмі.
  - Виміряйте амплітуду вихідного сигналу  $U_{out(max)}$ .

4. Дослід №2 (мала стала часу,  $\tau \ll t_u$ ):
  - Зменшіть номінал резистора  $R1$  (або ємність  $C1$ ) у 10-20 разів.
  - Спостерігайте зміну форми сигналу. Конденсатор має встигати заряджатися повністю.
  - Зафіксуйте форму сигналу та виміряйте амплітуду.
5. Дослід №3 (велика стала часу,  $\tau \gg t_u$ ):
  - Поверніть номінали до початкових і збільшіть  $R1$  (або  $C1$ ) у 10-20 разів.
  - Спостерігайте зміну форми сигналу. Вона має нагадувати трикутні імпульси.
  - Зафіксуйте форму сигналу та виміряйте амплітуду.
6. Результати вимірювань занесіть у таблицю 9.2.

Таблиця 9.2 – Дослідження інтегруючого кола (вихід на  $C$ )

№	Умова дослід- ду	$R1$ , кОм	$C1$ , нФ	Відно- шення $\tau/t_u$	Значення $\tau$ , мкс	Вихідна амплітуда $U_{C(max)}$ , В	Опис форми вихідного сиг- налу
1	$\tau \approx t_u$ (Базовий ре- жим)			$\approx 1$			Експоненційне зростання, не- повний заряд
2	$\tau \ll t_u$ (мала інер- ційність)						Повторює вхід- ний імпульс (трапеція)
3	$\tau \gg t_u$ (велика інер- ційність)						Майже лінійна (трикутна фор- ма)

#### 4.3 Дослідження диференціюючого $RC$ -кола (знімаємо сигнал з резистора $R1$ ). Визначення реакції кола на різкі зміни напруги (фронти)

1. Змініть схему вимірювання:
  - Поміняйте місцями резистор і конденсатор або просто перепідключіть Канал 2 осцилографа паралельно резистору  $R1$ .
  - *Важливо!* При використанні реального осцилографа (не симулятора) корпус («земля») щупа має бути підключений до спільної точки схеми. У колі  $RC$  спільною точкою є з'єднання резистора з «мінусом» джерела.
2. Повторіть досліди 1, 2, 3 для тих самих значень  $R1$  і  $C1$ , що й у попередньому етапі.
3. Спостерігайте за формою напруги на резисторі  $U_R$ . Зверніть увагу на появу різнополярних сплесків (піків).
4. Результати вимірювань занесіть у таблицю 9.3.

Таблиця 9.3 – Дослідження диференціюючого кола (вихід на  $R$ )

$N$	Умова дослі- ду	$RI$ , кОм	$CI$ , нФ	Відно- шення $\tau/t_u$	Значення $\tau$ , мкс	Вихідна амплітуда $U_{C(max)}$ , В	Опис форми ви- хідного сигналу
1	$\tau \approx t_u$ (Базовий ре- жим)			$\approx 1$			Експоненційний спад до нуля
2	$\tau \ll t_u$ (диференцію- вання)						Короткі гострі піки (голки) на фронтах
3	$\tau \gg t_u$ (розділова ємність)						Повторює вхід- ний сигнал (але зі зміщенням)

#### 4.4 Рекомендації до оформлення графіків

Для кожного з 6 дослідів (3 для інтегруючого кола та 3 для диференціюючого) у звіті мають бути наведені графіки осцилограм (або її скріншоти).

Графік має містити:

- Осі координат горизонтальна – час  $t$  [мкс/мс], вертикальна – напруга  $U$  [В].
- Два сигнали:
  - Вхідний сигнал  $U_{in}$  (бажано пунктиром або іншим кольором).
  - Вихідний сигнал  $U_{out}$  (суцільною лінією).
- Маркери – позначити на графіку тривалість імпульсу  $t_u$  та амплітудне значення.

#### 4. Індивідуальні завдання

Необхідно для заданих значень розрахувати  $\tau$ , порівняти її з тривалістю імпульсу  $t_u$  та схематично зобразити очікувану форму вихідної напруги на конденсаторі ( $U_C$ ). Параметри вхідного сигналу: прямокутні імпульси, амплітуда  $U_{in} = 5$  В.

Таблиця 9.4 – Параметри елементів схеми по варіантам

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
Опір $RI$ , кОм	1	10	4,7	2,2	100	0,5	33	5,1
Ємність $CI$ , нФ	100	10	22	47	1	220	3,3	10
Частота $f$ , кГц	1	5	2	1	10	0,5	4	20
Варіант	9	10	11	12	13	14	15	16
Опір $RI$ , кОм	1	15	2,2	47	10	20	1	3,3
Ємність $CI$ , нФ	900	6,8	10	2,2	100	4,7	47	6,8
Частота $f$ , кГц	0,2	1,5	50	3	0,5	10	100	50

## 6. Зміст звіту

1. Титульний аркуш.
2. Принципові електричні схеми досліджень (інтегруюча та диференціююча).
3. Розрахунок сталої часу  $\tau$  та тривалості імпульсу  $t_u$  для свого варіанту.
4. Графіки (осцилограми) вхідної та вихідної напруги для трьох випадків. Графіки повинні бути побудовані в одному часовому масштабі.
5. Висновки про вплив параметрів кола на форму вихідного сигналу.

## 7. Контрольні питання

1. Що таке перехідний процес і чому він виникає?
2. Сформулюйте закони комутації. Який закон комутації діє в  $RC$ -колі?
3. Що таке стала часу кола  $\tau$ ? Який її фізичний зміст?
4. В яких одиницях вимірюється добуток  $Ома$  на  $Фараду$ ? Доведіть це через розмірності.
5. Запишіть аналітичний вираз для напруги на конденсаторі при його заряді від джерела постійної напруги.
6. Як зміниться стала часу, якщо опір резистора збільшити вдвічі, а ємність зменшити вдвічі?
7. За якої умови  $RC$ -коло вважається інтегруючим?
8. За якої умови  $RC$ -коло вважається диференціюючим?
9. Яку форму матиме вихідна напруга на резисторі, якщо на вхід  $RC$ -кола подати ідеальний прямокутний стрибок напруги?
10. Чому при дуже малій сталій часу ( $\tau \rightarrow 0$ ) форма напруги на резисторі нагадує вхідні імпульси?
11. Як впливає частота вхідних імпульсів на форму вихідного сигналу при незмінних  $R$  і  $C$ ?
12. Чому напруга на конденсаторі не може змінитися стрибком?
13. Визначте значення напруги на конденсаторі через час  $t = \tau$ ,  $t = 3\tau$ ,  $t = 5\tau$  після початку заряду ( $y$  % від амплітуди).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Осадчук О. В. Теорія електричних кіл і сигналів. Частина 1 : навч. посіб. / О. В. Осадчук, О. С. Звягін. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 153 с.
2. Кичак В. М. Основи радіоелектроніки: навч. посіб. з грифом МОН України / В. М. Кичак, Ю. В. Крушевський, Д. В. Гаврілов. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 365 с.
3. Милютченко І. О. Довідник з основ теорії кіл : навч. посіб. для студентів ЗВО / І. О. Милютченко. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 152 с.
4. Сташук В. Д. Основи теорії та комп'ютерне моделювання електронних кіл : навч. посіб. для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В. Д. Сташук, А. В. Булашенко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 400 с.

*Електронне навчальне видання*

**Сергій Володимирович Костішин  
Дмитро Хуанович Штофель**

**Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт  
з дисципліни «Електроніка. Основи теорії кіл і сигналів» зі  
спеціальності «Біомедична інженерія»**

Рукопис оформив: С. Костішин

Редактор: Н. Кравчук

Оригінал-макет виготовлено в РВВ ВНТУ

Підписано до видання 8.01.2026

Гарнітура Times New Roman

Зам. № Р2026-002.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.